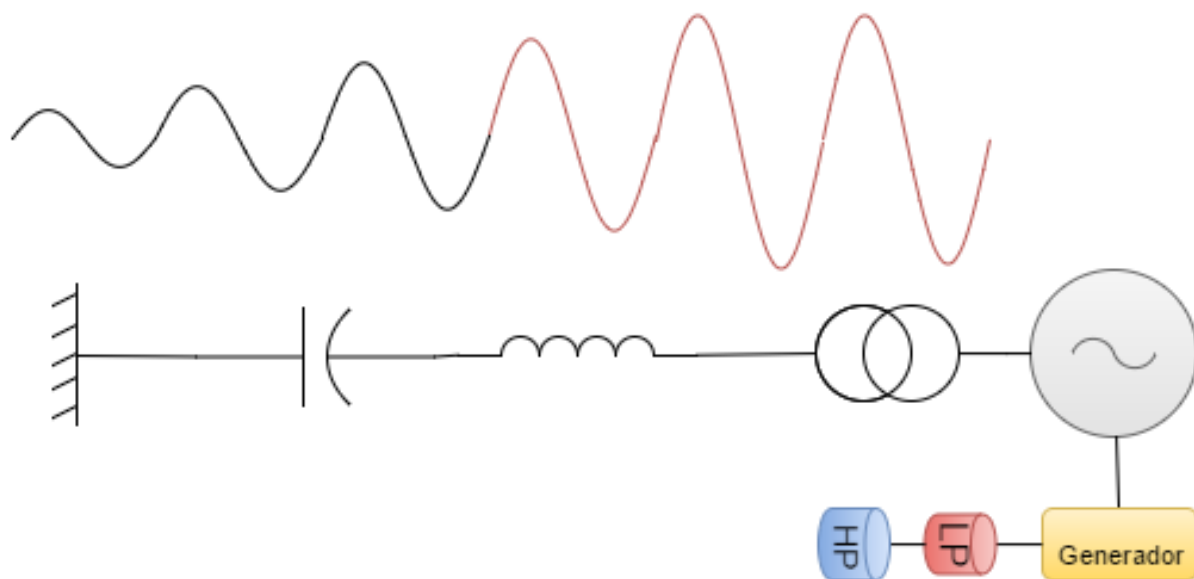


Mitigación de Resonancia Subsíncrona Mediante el uso de Unidades de Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción Integradas con un PWM-CSC



Sebastian Lopez Moncayo

Mitigación de Resonancia Subsíncrona Mediante el uso de Unidades de Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción Integradas con un PWM-CSC

Sebastian Lopez Moncayo

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, Junio de 2016
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA



Mitigación de Resonancia Subsíncrona Mediante el uso de Unidades de Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción Integradas con un PWM-CSC
©Sebastian Lopez Moncayo

Director: Alejandro Garcés Ruiz

Pereira, Junio de 2016

Programa de Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita. Pereira(Colombia)

TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

Agradecimientos

Es importante resaltar momentos significativos en mi existencia, elogiar a todas y a cada una de las personas que han marcado historia y dejan huellas imborrables en mi vida.

La universidad Tecnológica de Pereira abrió sus puertas y me dio oportunidades de crecer como persona moral e intelectualmente, conocí a personas tan maravillosas que ayudaron a alimentar mi espíritu en instantes de soledad y sosiego. Mis padres en la distancia fortalecían mis esperanzas con voces de aliento inculcando valores que me sirvieron para alcanzar lo que en este instante es mi premio.

Hoy es uno de esos días que me animan a gritar lo he logrado. Agradezco a Dios por ser la razón de mi existencia, por haberme proporcionado inteligencia y fuerza para alcanzar mis propósitos y nacer en un lugar maravilloso ejemplo de vida y formación humana.

Aura y Libardo como no darles gracias a mis padres esos seres que con su ejemplo y afán de superación. Sembraron en mis valores de responsabilidad, respeto, honestidad, amor, comprensión y estuvieron listos en la distancia a apoyar y cristalizar mis sueños. Gracias padres por sus preocupaciones y voces de aliento día a día, noche a noche y momento a momento.

Daniela mi querida hermana gracias, por tu amor fraterno e incondicional por invitarme a seguir a delante en mis quehaceres estudiantiles, por brindarme consejos que alimentan mis mañanas al iniciar un nuevo día para aprender algo nuevo en este camino.

Evelin aquella mujer que desde muy niña se robó mi corazón gracias por enseñarme a conocer la realidad de un mundo cambiante y despejar mi mente con tu riza, amor, en sueño y capacidad de espera.

A Sebastian mi hijo ese pequeño que llena mi vida de felicidad ese ser que llevo para cambiar mis tristezas en satisfacciones y ser la razón por la que lucho. Gracias hijo porque hubo noches que con tu mirada alumbraste mis pensamientos.

Al ingeniero Alejandro Garcés el motor que me impulso a seguir conocimientos y aplicarlos para construir un futuro mejor. Gracias por sus enseñanzas por brindarme su mano amiga, por ser portador de sueños y esperanza y formarme para ser un profesional digno de esta universidad.

Resumen

Este documento presenta una estrategia de control para mitigar el efecto de resonancia Subsíncrona en un sistema de potencia mediante el uso de unidades SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) integrados por medio de un convertidor PWM-CSC (Current Source Converter). La metodología propuesta estabiliza los modos oscilatorios torsionales del turbogenerador en un sistema de potencia, gracias al uso coordinado de amortiguamiento activo y un control proporcional de frecuencia. La estrategia se basa en el control de la potencia activa por medio de la carga y descarga de energía de la unidad SMES de tal manera que el desequilibrio energético creado por el fenómeno oscilatorio o Resonancia Subsíncrona (Subsynchronous Resonance-SSR) pueda ser compensado o amortiguado. El estudio de Resonancia Subsíncrona se lleva a cabo en el segundo modelo de referencia IEEE. Los resultados de simulación en Matlab-Simulink demuestran que la estrategia de control mitiga satisfactoriamente el fenómeno SSR. Aunque los sistemas altamente hidroeléctricos, pueden ser menos propensos al desarrollo de una resonancia Subsíncrona, las unidades SMES podrían usarse en Colombia para mitigar diferentes fenómenos oscilatorios.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Estado del arte	5
1.5. Resonancia Subsíncrona	6
1.6. Sistemas de almacenamiento de Energía Magnética por Superconduccion (SMES)	8
1.7. Principales resultados	8
1.8. Estructura del trabajo de grado	8
2. Sistemas SMES	10
2.1. Introducción a los sistemas de almacenamiento de energía	10
2.2. Visión General de un sistema SMES	12
2.3. Sistemas de Acondicionamiento de Potencia para la integración del sistema SMES	14
2.4. Integración de la unidad SMES al sistema de Potencia	17
3. Convertidor de Fuente de Corriente (PWM-CSC)	19
3.1. Generalidades	19
3.2. Modulación PWM	21
3.3. Modelo Promediado	25
4. Estrategia de Control	28
4.1. Control de la corriente DC del convertidor PWM-CSC.	28
4.2. Amortiguamiento Activo(Active Damping)	31

4.3. Control de Frecuencia(Droop)	33
5. Resultados	35
5.1. Validación del modelo promediado PWM-CSC	35
5.2. Validación del control de la corriente DC del convertidor PWM-CSC	38
5.2.1. Control sin active Damping	39
5.2.2. Control con Active Damping	40
5.3. Simulación digital de la SSR con y sin la unidad SMES	41
5.3.1. Sistema en Estudio SSR	41
5.3.2. Simulación del fenómeno de Resonancia Subsíncrona con SMES en el dominio del tiempo.	43
5.3.3. Análisis Modal en el dominio de la Frecuencia.	47
6. Conclusiones	49
6.1. Futuros Trabajos	49
Appendices	51
A. Sistema de potencia simulado.	51
A.1. Segundo modelo de referencia IEEE para la simulación del fenómeno de resonancia Subsíncrona	51
A.2. Parámetros nominales de la unidad SMES	53
A.3. Parámetros de la estrategia de control	53
A.4. Sistema de potencia en simulink-Matlab	54

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) están expuestos a diferentes fenómenos oscilatorios debido a perturbaciones, anomalías y maniobras operativas. En la mayoría de los casos, el sistema mismo puede amortiguar estas oscilaciones. No obstante, en algunos casos se pueden producir oscilaciones de frecuencia que se mantienen durante un periodo de tiempo prolongado lo cual puede ocasionar daños mecánicos permanentes y disminuir el tiempo de vida útil de los equipos. Uno de los fenómenos oscilatorios más críticos es el de Resonancia Subsíncrona o SSR por sus siglas en inglés (*Subsynchronous resonance*). Este fenómeno se caracteriza por las oscilaciones electromecánicas por debajo de la frecuencia fundamental, las cuales se amplifican llegando a generar inestabilidad.

La SSR comenzó a estudiarse en la década de los setenta, posterior al daño físico que se presentó en el eje del grupo turbina-generador de la central térmica de vapor Mohave de Southern California Edison, Estados Unidos entre 1970 y 1971. El daño provocó la salida por varios meses de un turbo generador, ocasionando pérdidas económicas considerables.[1]

La definición formal propuesta por la IEEE establece que la Resonancia Subsíncrona como la condición en que la red eléctrica intercambia energía con una turbina a una o más frecuencias naturales del sistema por debajo de la frecuencia síncrona.[2]

La situación más común en la que se puede presentar el fenómeno SSR es cuando hay compensación capacitiva en serie en las líneas de transmisión. Esto ocurre cuando la frecuencia complementaria a la natural de oscilación está próxima a alguna frecuencia natural de las oscilaciones torsionales del rotor del turbogenerador.

Los compensadores capacitivos en serie, aumentan la capacidad de transmisión de potencia; estos se instalan en serie con los conductores de fase en puntos seleccionados a lo largo de la línea. Su efecto es reducir la reactancia inductiva de la línea, reduciendo de este modo las caídas de tensión en esa línea y aumentando el límite de estabilidad hasta lograr mantenerlo

estable. También, se ha demostrado que la compensación serie, incrementa la capacidad de transmisión de las líneas largas, a solo una fracción del costo de la nueva línea de transmisión, lo que resultaría una solución muy útil considerando el crecimiento de la demanda, puesto que al momento de construir una línea de transmisión, en algunas ocasiones, solamente se tiene en cuenta la demanda energética en ese momento sin incluir el crecimiento de la carga.

Otras fuentes de resonancia pueden ser los convertidores HVDC, dispositivos FACTS y otros elementos basados en electrónica de potencia [3]. Incluso las fuentes de generación de energía no renovable como la undimotriz tienen potencial para interactuar con los modos torsionales del turbogenerador [4].

A medida que los estudios avanzan salen a luz nuevas propuestas con el fin de buscar la solución más adecuada al problema de estabilidad. Los elementos almacenadores de energía son una de las tecnologías con mayor potencial de aplicación para la solución de problemas oscilatorios. Sin embargo, no todas las tecnologías de almacenamiento de energía son aplicables a los mismos problemas operativos. Por ejemplo, los sistemas basados en baterías pueden almacenar energía a largos plazos, pero están limitados al momento de entregar potencia instantánea. Es por eso que se propone un sistema SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) debido a su respuesta rápida y alta eficiencia en la amortiguación de todos los modos oscilatorios de la SSR.

La tecnología SMES ofrece características únicas de corto tiempo de respuesta, bajas pérdidas, confiabilidad, y estabilidad. Éstos pueden almacenar gran cantidad de energía, soportar un número casi ilimitado de ciclos de carga y descarga. Igualmente, el tiempo de descarga es relativamente alto y por consiguiente puede proveer estabilidad durante transitorios y participar en el control primario de frecuencia a nivel de transmisión.

La idea de integración de unidades SMES al sistema de potencia es relativamente nueva, la mitigación del fenómeno de SSR convierte al SMES en un candidato preferido para su desempeño óptimo en comparación con las metodologías actuales. Es por esto que se debe realizar un control apropiado y eficiente para buscar que el dispositivo SMES evite al máximo las alteraciones asociadas a una falla en el SEP.

Los sistemas SMES suelen ser integrados mediante convertidores de conmutación de línea basados en tiristores. Sin embargo, la tecnología de conmutación forzada puede presentar ventajas al momento de integrar unidades SMES.

El convertidor más común con conmutación forzada es VSC (*Voltage Source Converter*). No obstante, los sistemas superconductores requieren un convertidor de corriente. Por ello, usualmente se utiliza una etapa adicional de Chopper DC-DC de dos cuadrantes. Otra posible alternativa es el uso de un convertidor tipo PWM-CSC (*pulse width modulated current source converter*) que permitiría integrar el SMES en una sola etapa de conversión. Es por esto que

el PWM-CSC puede ser una buena alternativa. Este trabajo analiza la posibilidad de utilizar este tipo de convertidor y propone un control simple para mitigar el efecto de la SSR.

La investigación relacionada con sistemas SMES en el ámbito internacional, está enfocada en el uso de convertidores VSC o LCC. Poca investigación ha sido realizada en el uso de sistemas PWM-CSC. En la revisión bibliográfica realizada por los autores, no se encontró ninguna referencia que presente simultáneamente los tres aspectos desarrollados en este trabajo.

1.1. Planteamiento del problema

Los compensadores capacitivos en serie en líneas de transmisión, hacen posible aumentar la cargabilidad y transferencia de energía, de forma económica y eficiente. De igual manera ayudan a la estabilidad, al control de potencia y compensan parte de la reactancia inductiva inherente a las líneas de transmisión en el sistema eléctrico. Una de las preocupaciones, para hacer uso de compensadores capacitivos en las líneas de transmisión, es la aparición del fenómeno de resonancia Subsíncrona (SSR) y el problema de estabilidad en el que se engloba.

En Colombia, existen varias centrales termoeléctricas que abastecen aproximadamente un 30 % de la demanda energética del país; la cual se ve afectada por Fenómeno del Niño que conlleva a la reducción de lluvias y del nivel de los embalses de las centrales hidroeléctricas. Estos cambios importantes en el sistema eléctrico colombiano, hacen posible la presencia de dos elementos requeridos para la aparición del fenómeno de resonancia Subsíncrona: a) líneas de transmisión de gran longitud, con capacitores en serie, debido al crecimiento de la demanda; y b) mayor participación de centrales térmicas o unidades de turbo-vapor. Esto favorece la importancia de realizar un estudio, basado en la mitigación de todos los modos de oscilación asociados al SSR.

Una forma de mitigar el fenómeno de resonancia Subsíncrona, es mediante un sistema de almacenamiento de energía como las unidades SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), una alternativa adecuada para la estabilidad del sistema, ejerciendo un control capaz de amortiguar las oscilaciones de bajas frecuencias o resonancia Subsíncrona, permitiendo así, el uso de compensadores capacitivos en el sistema eléctrico colombiano.

Por lo tanto, surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo integrar la unidad SMES al sistema Eléctrico? ¿Cómo validar el desempeño de la unidad SMES en presencia del SSR? ¿Qué esquema de control es el más adecuado para mitigar SSR?; estas son algunas de las muchas preguntas que van a surgir y cuya respuesta resulta en el motivo de investigación de este proyecto.

1.2. Justificación

En la medida en que la demanda energética del sistema eléctrico colombiano crece, se obliga a la construcción de nuevas líneas de transmisión, lo que resulta ser muy costoso; la compensación en serie en los sistemas eléctricos de potencia actuales, han surgido como una solución económica al problema de transmisión de potencia y estabilidad en el sistema. Sin embargo, esto implica que aparezcan fenómenos oscilatorios de bajas frecuencias o resonancias Subsíncrona.

La resonancia Subsíncrona hace difícil la aplicación de los compensadores capacitivos en las líneas de transmisión desaprovechando los beneficios y las ventajas que se podrían obtener. Por esta razón, es necesario crear esquemas de protección y métodos enfocados en la mitigación de este fenómeno oscilatorio.

En este marco, se tiene que las primeras investigaciones que se hicieron con la aparición del fenómeno oscilatorio Subsíncrona, se destinaron a determinar, como los esquemas deben proteger al generador, de los transitorios originados en la red de transmisión; sin embargo, resulta difícil asegurar que el sistema se encuentre totalmente a salvo de este fenómeno, considerando que al momento de planificar esquemas de protección, no es posible identificar todas las condiciones críticas que dan lugar al SSR, debido a la complejidad de los sistemas eléctricos de potencia, lo que hace necesario la utilización de dispositivos auxiliares que capaces de atenuar las oscilaciones de bajas frecuencias.

En un primer momento se pensó en que la mejor manera de evitar la SSR, es la reducción del nivel de compensación serie, instalado en las líneas de transmisión; sin embargo, la cantidad de compensación en serie, se selecciona en función de los requisitos de rendimiento del sistema, así que reducir el nivel de compensación podría restringir el funcionamiento del sistema y crearía la necesidad de una nueva línea de transmisión. Esto abre la posibilidad de buscar soluciones, que no impliquen la salida de los compensadores capacitivos en serie.

A medida que los estudios avanzan, salen a la luz nuevas propuestas con el fin de buscar la solución más adecuada. Es por eso que se propone un sistema SMES, debido a su respuesta rápida y alta eficiencia en la amortiguación de todos los modos de oscilación de la SSR, e igualmente, mejora la estabilidad dinámica y la calidad de potencia en el sistema eléctrico.

Además, los sistemas SMES presentan una gran ventaja en cuanto a la gran cantidad de aplicaciones: puede ser utilizado en cualquier nivel de tensión; la ubicación topográfica no es un problema; no posee limitaciones ambientales; y lo más importante es que este sistema puede absorber o entregar potencia activa en cualquier instante en cuanto el sistema lo requiera o cuando se presente alguna anomalía.

Es importante mencionar que la tecnología SMES, en la parte constructiva, en estos últimos años ha avanzado considerablemente debido a los avances en la superconductividad

y los materiales semiconductores, y en la configuración y estructura de la bobina. Como resultado de esto, las unidades SMES van a ser potencialmente utilizadas en el sector eléctrico, reducirán su costo y pueden llevar a que su aplicación sea mucho más comercial. Es de esperar que sus grandes ventajas y beneficios harán que la unidad SMES sea una alternativa viable para el almacenamiento de energía.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de control que mitigue el fenómeno de resonancia Subsíncrona mediante el uso de unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el fenómeno de resonancia Subsíncrona y el problema de estabilidad que genera en el sistema de potencia.
- Evaluar la unidad SMES como una posible solución.
- Proponer la unidad SMES basado en un convertidor de potencia PWM-CSC (Current Source Converter).
- Diseñar un esquema de control adecuado para el convertidor de potencia PWM-CSC de tal manera que el sistema SMES pueda ser integrado a la red y permita mitigar las resonancias Subsíncrona del sistema.
- Integrar como un todo los componentes analizados y diseñados en un solo sistema para validar el desempeño de la unidad SMES en presencia del fenómeno de resonancia Subsíncrona.
- Reportar los resultados analizados mediante la simulación digital del fenómeno de resonancia subsíncrona y el dispositivo SMES llevada a cabo en Simulink de Matlab.

1.4. Estado del arte

En la literatura se encuentra varios métodos que impiden que se presente un SSR como filtro de bloque [5], el control de excitación[6], compensador VAR estático [7], HVDC [8],

entre otros.

Sin embargo, son pocas las investigaciones realizadas con respecto a los sistemas SMES en la aplicación de la mitigación del fenómeno oscilatorio Subsíncrono, y lo más reciente que se ha podido encontrar en las revistas y artículos de investigación [9],[10],[9],[11], es que los investigadores se han enfocado en el control de los convertidores de potencia.

Como ya se ha mencionado, tener un control en la energía almacenada de la unidad SMES, permite mitigar cualquier modo oscilación de baja frecuencia, por tal motivo los convertidores electrónicos de potencia desempeñan un papel muy importante.

Se han desarrollado nuevas estrategias de control tales como controlador PID [12], control del algoritmo [9], la red neuronal adaptativa [12]-[13] y controlador difuso de los SMES basados en tiristores [10]. Las estrategias se basan en la señal de aceleración del generador, de esta manera el SMES absorbe o genera energía, con el fin de realizar una compensación al desequilibrio energético generado por diferentes perturbaciones en el sistema eléctrico, de modo que suprime las oscilaciones Subsíncronas.

Estas nuevas estrategias de control, se han validado con simulaciones, demostrando la efectividad de la unidad SMES en mitigación del fenómeno oscilatorio, permitiendo los niveles más altos de compensación en serie.

También es importante mencionar, que el impacto de energías renovables no convencionales en el sistema de potencia que se han venido implementando con mayor fuerza durante estos últimos años en el mundo, como la eólica [14] y undimotris [15], que también se ven afectadas por el fenómeno oscilatorio subsíncrono. Con lo anterior se puede argumentar a un más la importancia de realizar un estudio enfocado a la mitigación de este fenómeno utilizando la unidad SMES. Cabe mencionar que la unidad SMES estabiliza las fluctuaciones de potencia de las energías renovables ya mencionadas, con lo que se puede inferir que la unidad SMES, en algunos años, será potencialmente utilizada en el sistema eléctrico de potencia.

El enfoque de este proyecto está centrado, en crear una nueva estrategia de control del sistema SMES en los convertidores de potencia basados en conmutación forzada como los PWM-CSC, debido a que estos presentan una gran ventaja a diferencia de otro tipo de convertidores con el fin de mitigar inestabilidades dinámicas producto del fenómeno de resonancia Subsíncrona en el sistema de potencia.

1.5. Resonancia Subsíncrona

La resonancia Subsíncrona (SSR) es un problema de estabilidad dinámica en los generadores síncronos. Los turbogeneradores que son utilizados en centrales térmicas están más propensos al fenómeno oscilatorio de baja frecuencia. El generador tiene varias etapas y está

compuesto por diferentes masas a lo largo del eje, como las turbinas de vapor, el generador y el excitador (si las hay). Por lo tanto, el eje del turbogenerador no es rígido actúa como resorte y si por alguna razón en el sistema eléctrico se crea un par de torsión externo a la máquina y se aplica en un extremo del eje este se retuerce.

El rotor del generador oscila a una frecuencia natural poco amortiguadas que está alrededor de 1 Hz cuando se produce una anomalía de tipo eléctrico ya sea un cortocircuito, una variación en la potencia mecánica, en la excitación del generador y maniobras operativas, en estos casos existen inestabilidades de tipo eléctrico, mientras otros modos de oscilación que se superponen a los anteriores son las oscilaciones torsionales en el eje del generador.

El sistema mecánico del generador tiene modos torsionales naturales poco amortiguados en un intervalo de 10 a 45 Hz [1]. Cuando surgen pares eléctricos transitorios en la masa del generador a bajas frecuencias que pueden llegar interactuar con los modos mecánicos de la máquina da lugar a que se presente el fenómeno de resonancia Subsíncrona.

La definición formal propuesto por la IEEE establece que la Resonancia Subsíncrona como la condición del sistema de potencia donde la red eléctrica intercambia energía con una turbina a una o más de las frecuencias naturales del sistema por debajo de la frecuencia síncrona.[2]

Se ha encontrado que este problema también puede surgir con la operación radial de un enlace HVDC conectado a un turbogenerador y con compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC).[1]

Hay dos aspectos del problema del SSR: el primero es la autoexcitación de la máquina (llamado estado estable del SSR) y el segundo los pares transitorios (llamado SSR transitorio). Estos problemas de estabilidad provocan fatiga o daños en las partes mecánicas del generador lo cual conlleva a quedar fuera de funcionamiento en el sistema eléctrico o una posible inestabilidad del sistema.

El problema de estado estacionario se puede analizar como un problema de estabilidad de pequeña señal pero para ser evitado es necesario una planificación adecuada de los sistemas eléctricos de potencia. El problema de los pares transitorios se debe resolver con el uso dispositivos auxiliares que proporcionen amortiguación al sistema mecánico del generador, mientras que el problema de las interacciones torsionales se debe resolver con el uso de filtros eléctricos que limiten la magnitud de los pares subsíncronos transitorios.

Existen varias técnicas analíticas que se utilizan para estudios de resonancia Subsíncrona. Las técnicas más comunes son la exploración de frecuencia, valores propios y simulación en el dominio del tiempo y frecuencia.

Si se requiere tener un mejor análisis para la interacción de torsión real o pares transitorios técnicas como los valores propios o eigenvalores y simulaciones en el dominio del tiempo y en

frecuencia se utilizan. Estas simulaciones tienen en cuenta los efectos no lineales, y permiten una evaluación en el sistema completo para realizar diferentes análisis en cuanto a un fallo.

En este proyecto se utilizará la técnica de simulación en el dominio del tiempo y la frecuencia para analizar los problemas que genera el fenómeno oscilatorio en el sistema de potencia.

1.6. Sistemas de almacenamiento de Energía Magnética por Superconduccion (SMES)

El almacenamiento de energía magnética por superconducción(*Superconducting Magnetic Energy Storage*) o SMES es un sistema de almacenamiento que permite almacenar energía por medio de campo magnético creado por la circulación de una corriente continua en una bobina superconductora que está refrigerado a una temperatura por debajo de la temperatura crítica de superconductividad. En el capítulo 2 se ampliará este tema.

1.7. Principales resultados

Los principales resultados de este trabajo de grado son los siguientes

- Un estudio que integra tres elementos: fenómeno de resonancia Subsíncrona, uso de PWM-CSC y unidades SMES
- Implementación de un modelo promediado del PWM-CSC para simulaciones dinámicas basado en un control coordinado que incluye amortiguamiento activo y ganancia proporcional de frecuencia
- Una implementación detallada en Matlab-Simulink.

1.8. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado esta organizado de la siguiente forma:

- En el Capitulo 2 se da una breve introducción a los diferentes sistemas de almacenamiento de energía y una visión general de lo que es un sistema SMES.

- En el capítulo 3 se presenta las generalidades y modelamiento del convertidor PWM-CSC.
- En el capítulo 4 se describe la estrategia de control propuesta para mitigar el fenómeno de resonancia Subsíncrona.
- En el capítulo 5 se presenta los resultados obtenidos para validar el modelo promediado y la estrategia de control para amortiguar el fenómeno dinámico.
- En el capítulo 6 las conclusiones del proyecto.

Capítulo 2

Sistemas de almacenamiento de energía magnetica por superconduccion

2.1. Introducción a los sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son uno de los elementos más importantes en la operación de las redes inteligentes. Éstos permiten aplanar la curva de demanda y por ende, aumentar la eficiencia en la transmisión. Igualmente, los elementos almacenadores de energía permiten realizar regulación de frecuencia lo cual impacta en la operación de los sistemas eléctricos. Existe una gran cantidad de elementos almacenadores de energía entre los que se destacan los siguientes:

Los volantes de inercia (*flywheel system*) que son usualmente máquinas síncronas de imanes permanentes diseñadas con una inercia superior a la de las máquinas convencionales. La máquina es operada a alta frecuencia de rotación con el fin de almacenar gran cantidad de energía cinética. Las pérdidas son minimizadas mediante la creación de una presión de vacío en el entre-hierro y el uso de cojinetes magnéticos para eliminar la fricción. .

Otro dispositivo con gran capacidad de almacenamiento y descarga es el conocido como supercondensador, que sigue la misma lógica de operación de uno tradicional. Son capacitores con una capacidad de almacenamiento muy superior a los capacitores electrolíticos. Permiten almacenar energía en forma de campo eléctrico por cortos periodos de tiempo. Su aplicación esté restringida a la regulación de frecuencia y otros servicios relacionados con la dinámica y

estabilidad de pequeños sistemas.

Los sistemas BESS (*Battery Electric Storage System*) en español sistema de almacenamiento eléctrico por baterías, son dispositivos que transforman energía química de sus materiales en energía eléctrica mediante reacciones de oxidación y reducción. Está constituida por una unidad básica, llamada celda(existen gran diversidad), que posteriormente es unida a otras, en serie o en paralelo, para obtener unos niveles de capacidad o de tensión específicos. Son usados en los sistemas eléctricos de potencia pero estas presentan problemas en el manejo adecuado de su energía y el tiempo de entrega, representando en cierto modo un agravante para su uso, además de otras implicaciones como vida útil e impacto ambiental.

Otro tipo de almacenamiento de energía es el PHES (*Pumped Hydroelectric Energy Storage*) o almacenamiento de energía hidroeléctrico por bombeo que consiste en bombear agua desde un depósito inferior a otro situado a mayor altitud. Cuando el agua almacenada en el depósito superior pasa a través de una tubería hidráulica produce energía eléctrica, esta cantidad almacenada podrá ser inyectada en horas pico de demanda del sistema, con un bajo costo de la energía y posibilidad de regulación de frecuencia, necesita de inmensos espacios, presenta dificultades ante ciertos fenómenos naturales como el fenómeno del niño.

Al igual que el anterior, el sistema CAES (*Compressed Air Energy Storage*) o almacenamiento de energía por aire comprimido, es una tecnología donde el aire se comprime y se almacena en depósitos o cavidades subterráneas. La energía almacenada se libera durante los intervalos de mayor demanda, expandiendo el aire a través de una turbina.

Por ultimo, la unidad SMES es un dispositivo que puede conseguir tiempos de devolución de energía en un intervalo de minutos en incluso segundos, con picos de potencia elevados. Este método proporciona gran eficiencia, ya que la bobina superconductora prácticamente no tiene pérdidas por efecto Joule, y solo se consideran las pérdidas del convertidor electrónico, presentando pocas conversiones energéticas intermedias, por ello su gran atención a problemas de perturbaciones en la red con gran capacidad y rapidez.

Las unidades de compensación con almacenamiento de energía han demostrado ser una solución eficiente en aplicaciones a niveles de baja y media tensión en donde se presente una alta variabilidad de la generación o la demanda. Estas contribuyen a suavizar la potencia en el sistema, incrementar la estabilidad y aumentar la eficiencia en sistemas con alta penetración de fuentes renovables tales como la generación eólica, solar foto voltaica y undimotriz entre otras.

Una forma de compensar oscilaciones Subsincronas, es mediante el uso de dispositivos almacenadores de energía, aunque no todos los almacenadores de energía tiene la capacidad de ejercer un control en la frecuencia del sistema, un ejemplo son las baterías, que por su lenta respuesta en el ciclo de carga y descarga, no hacen que sean útiles en este tipo de

aplicaciones.

En la figura 2.1 muestra el rango de aplicación de diferentes sistemas de almacenamiento de energía como función de su potencia nominal y de su tiempo de descarga a potencia nominal. Como se puede observar, los sistemas SMES permiten almacenar grandes cantidades de energía por lo cual pueden ser utilizadas tanto a nivel de potencia como a nivel de distribución. Igualmente, el tiempo de descarga es relativamente alto y por consiguiente puede participar del control primario de frecuencia a nivel de transmisión. Estas dos características hacen de este tipo que los SMES sean potencialmente útiles en el tipo de aplicaciones que se estudiaran en este proyecto.

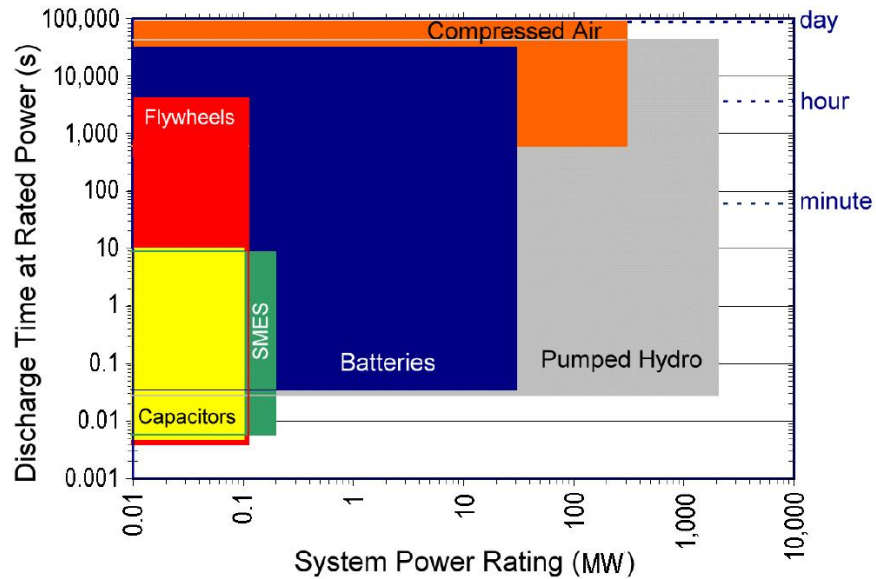


Figura 2.1: Comparación de potencia nominal, capacidad y tiempo de descarga de diferentes tecnologías de almacenamiento de energía (tomada de [16])

2.2. Visión General de un sistema SMES

A diferencia de otras tecnologías de almacenamiento de energía, los sistemas SMES, son más eficientes, confiables, tienen larga vida útil y bajo impacto ambiental. Su principal ventaja para el problema en cuestión, radica en que es que son capaces de descargar grandes cantidades de energía, en un corto periodo de tiempo. Se estima que una unidad SMES puede tener el 95 % de eficiencia [4], mientras que los demás sistemas de almacenamiento típicos, co-

mo los de bombeo hidroeléctrico y las baterías, tienen una eficiencia entre el 60 % y 70 % [17]. Así mismo, puede alcanzar niveles de potencia y tensión adecuados para ser implementados a nivel de transmisión.

Las unidades SMES almacenan energía de la misma forma en que lo hace un inductor convencional. Es decir, almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La diferencia radica en que este sistema utiliza superconductores para construir el devanado; de esta forma se elimina las pérdidas generadas por efecto Joule en el conductor.

Los SMES, tiene 3 elementos esenciales: una bobina construida con un superconductor, un sistema de refrigeración y un convertidor de potencia como se muestra en la Figura 2.2. Los SMES, como su nombre lo indica, almacenan energía en forma de campo magnético generado por una fuente de corriente directa (DC) en una bobina enfriada criogénicamente hasta alcanzar una temperatura menor a la crítica de superconducción. Esta temperatura se mantiene con un criostato, que contiene helio o nitrógeno líquido.

Existen dos tipos de materiales superconductores: los de baja temperatura o LTS (*low temperature superconductors*) que tienen una temperatura crítica del orden de los 5K (268.15°C). Mientras que los conductores de alta temperatura HTS (*high temperature superconductors*) tienen una temperatura crítica de los 70K (-203.15°C).[18]

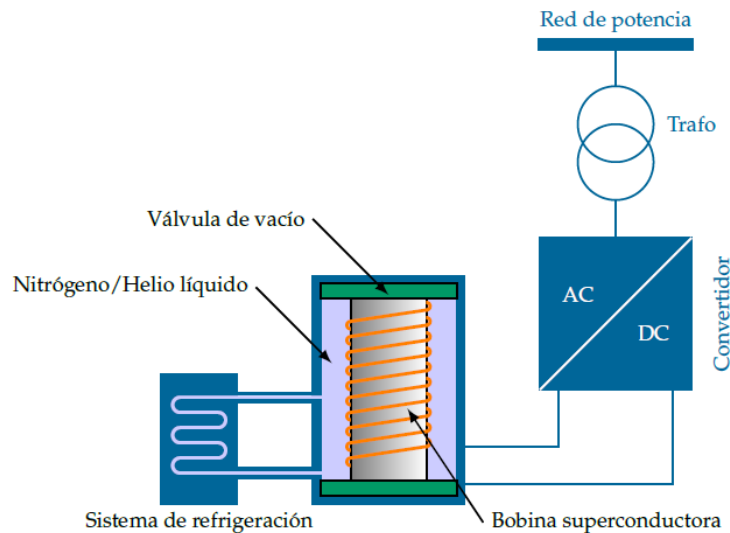


Figura 2.2: Diagrama esquemático del sistema SMES (tomada de [18])

Las altas carga de refrigeración para los conductores LTS hacen que las unidades SMES

sean costosas. Sin embargo, en estos últimos años los materiales superconductores HTS han avanzado considerablemente, reduciendo su temperatura crítica y por ende el costo de la unidad SMES. Es de esperar que con los nuevos avances en la parte constructiva de la tecnología SMES permitan su aplicación en sistemas como el colombiano.

Los SMES tienen un campo de investigación muy amplio en los sistemas eléctricos de potencia que se ha venido estudiando desde principios de la década posterior a 1970. A partir de este año ha despertado el interés de varias empresa eléctricas, debido a la cantidad de aplicaciones y beneficios que podrían obtener.

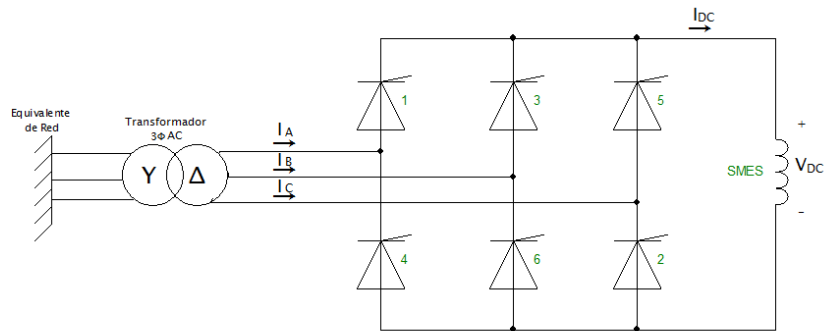
2.3. Sistemas de Acondicionamiento de Potencia para la integración del sistema SMES

Los sistemas SMES deben utilizar un sistema de acondicionamiento de potencia o convertidor de potencia para ser implementados y conectados a la red. Éstos permiten, no solo adecuar la potencia para que sea entregada al sistema AC, sino también hacer un control de la corriente directa (DC) y por lo tanto de la energía almacenada. El control de carga y descarga de energía de la unidad SMES proporcionado por los convertidores, permite así mismo amortiguar las oscilaciones de baja frecuencia en el sistema de potencia si son controlados adecuadamente.

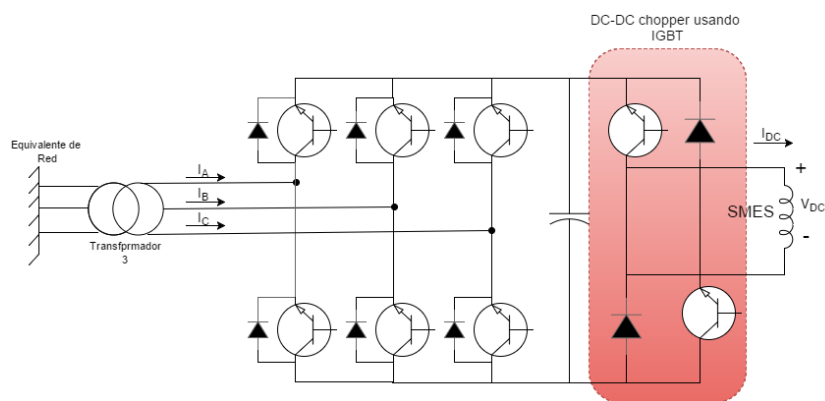
Según la tecnología y configuración topológica de los convertidores, los dos más utilizados para estas aplicaciones corresponden a: los LCC (*line commutated converter*) que son basados en tiristores y los VSC (*voltage source converter*). Una tercera alternativa un poco menos estudiada es el PWM-CSC (*pulse width modulated current source converters*) que utiliza conmutación forzada tal como el VSC pero controla corriente en vez de tensión. Este tipo de convertidores se muestran esquemáticamente en la figura 2.3.

La tecnología de conmutación de línea (LCC) basada en tiristores [19]-[20], fue una de las primeras en ser utilizadas en los sistemas SMES. La desventaja de estos convertidores es que inyectan armónicos a la red lo cual repercute en un desmejoramiento de la calidad de la forma de onda en el sistema AC. Así mismo, los LCC tienen una controlabilidad limitada además de requerir un suministro constante de reactivos.

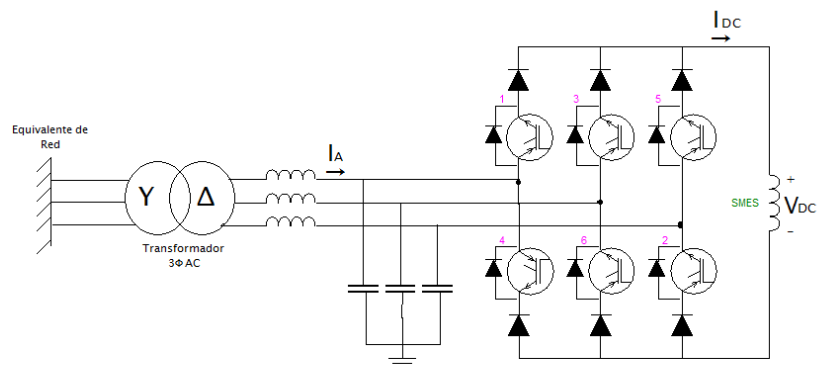
Por otro lado, la tecnología de conmutación forzada mejora ostensiblemente la calidad de la forma de onda y permite realizar más acciones de control sobre el sistema AC, tales como controlar la potencia activa y reactiva de manera independiente y filtrado de corrientes armónicos entre otras.



(a) Unidad SMES con un convertidor de potencia de seis pulso AC/DC tiristores.



(b) Configuración básica del sistema SMES basado en VSC.



(c) Sistemas SMES con PWM-CSC

Figura 2.3: Sistemas de acondicionamiento de potencia para la integración del sistema SMES al sistema de potencia.

La tecnología VSC [21] es la más utilizada en aplicaciones industriales tales como transmisión HVDC, variadores de velocidad, STATCOMS [22], e integración de energías renovables entre otras. Sin embargo, los VSC necesitan de una etapa adicional de conversión DC/DC ya que la bobina superconductora requiere una corriente constante y capacidad de variación de la tensión (ver figura ??).

De otro lado, los PWM-CSC [21] permite integrar directamente la bobina superconductora sin necesidad de etapas de conversión adicional. Es por esto, que los PWM-CSC pueden ser la manera más adecuada para integrar los sistemas SMES a la red. Una integración directa tiene efectos positivos en el ancho de banda del control y en la eficiencia del sistema de conversión.

En la tabla se resume las características y diferencias de los convertidores de potencia:

Criterio	Configuración Topologica de los SMES		
	SMES basado en tiristores	SMES basado en VSC	SMES basado en CSC
Control de potencia activa y reactiva	Los SMES basados en tiristores puede controlar la potencia activa de manera fácil con el angulo de disparo de los tiristores, pero no permite un control independiente de la potencia activa y reactiva.	Los SMES basados en VSC pueden controlar la potencia activa y reactiva, que fluye a través de la bobina superconductora y del sistema eléctrico de potencia de manera independiente.	Controla la potencia real y reactiva de un modo independiente, ademas esta topologia es capaz de proporcionar un alto nivel de potencia reactiva capacitiva, la potencia de flujo de estos sistemas esta limitada por la capacidad de la bobina superconductora.
Estructura de Control	Implementacion sencilla	Incluye un circuito AC/DC y un Chopper DC-DC de 2 cuadrantes lo que hace que el control de este sistema sea complicado	Posee solo un circuito AC/DC, por lo tanto es de fácil control, ademas para potencias muy altas estas topologias permiten la conexión de múltiples puentes en cascada.
Distorsión armónica total (THD)	Distorsión armónica alta	Distorsión armónica baja	Distorsión armónica baja
Voltaje de Rizado en la Bobina	Existe voltaje de rizado con el uso de este convertidor	Existe voltaje de rizado con el uso de este convertidor	El voltaje de rizo es mucho menor con esta configuración esto implica que las perdidas de AC en la bobina son mucho menores

Tabla 2.1: Características y diferencias de los convertidores de Potencia(tomada de [4])

Como se observa en la tabla 2.1 de los convertidores de potencia, que permite validar el desempeño del SMES de una manera adecuada, eficiente y económica, es el PWM-CSC por esta razón es el convertidor de potencia que se requiere utilizar, con el fin de poder hacer control en las oscilaciones Subsíncronas presentes en el sistema de potencia.

En los SMES basados en PWM-CSC como ya se observó en la figura ??, el lado de corriente directa se encuentra conectado la bobina superconductora y el lado de corriente alterna está conectado a la red, acompañado de un banco de condensadores que permiten filtrar los armónicos de orden superior, de la corriente alterna de la línea. Además los PWM-CSC presenta una gran versatilidad en su funcionamiento, que permite ser utilizado exitosamente tanto en sistemas de media como de alta potencia, teniendo un margen de pérdidas relativamente pequeñas comparadas, con las del sistema, aumentando la eficiencia en el dispositivo.

2.4. Integración de la unidad SMES al sistema de Potencia

Las unidades SMES son integradas al sistema de potencia como un dispositivo shunt de forma similar a un compensador de potencia reactiva o STATCOM(*static synchronous compensator*, por sus siglas en ingles) [22] como se muestra en la figura 2.4.

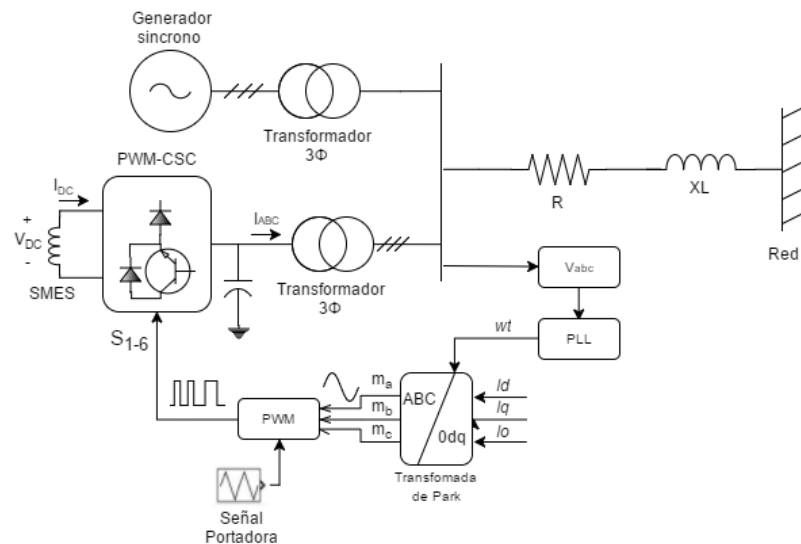


Figura 2.4: Diagrama unifilar de la unidad SMES sincronizado con la red

En la figura 2.4 se observa como el sistema SMES es integrado al sistema de potencia por medio de un dispositivo de control PLL (*Phase-Locked Loop*), el cual permite obtener la frecuencia y la fase del voltaje medido en el lado AC del PWM-CSC (ver figura 2.5) y a través de las señal de control o señal moduladora la unidad SMES puede entrar en sincronismo con la red.

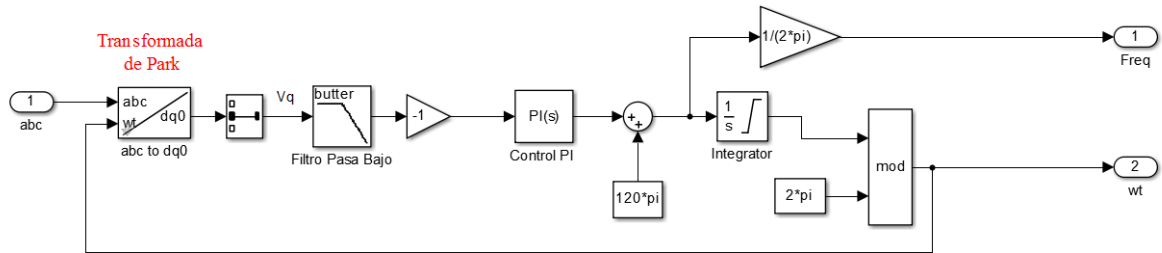


Figura 2.5: Diagrama unifilar de la unidad SMES sincronizado con la red

Al ser un dispositivo de almacenamiento de energía con ciclos rápidos de carga y descarga, la unidad SMES puede compensar las oscilaciones de potencia producidas por cualquier fenómeno dinámico incluido la SSR. Sin embargo, para que pueda funcionar adecuadamente se requiere de un control de los ciclos de carga y descarga el cual es implementado por medio del convertidor PWM-CSC.

Capítulo 3

Convertidor de Fuente de Corriente (PWM-CSC)

3.1. Generalidades

El principal objetivo del convertidor estático de potencia PWM-CSC (*Pulse width modulated current source converters*) es producir ondas de salida tipo AC, a partir de una fuente de alimentación de tipo DC. Este convertidor puede funcionar como un rectificador o inversor. Además es un convertidor que presenta una gran versatilidad en su funcionamiento y puede ser usado exitosamente tanto en aplicaciones de media como de alta potencia con bajas pérdidas por conmutación. Además la señal de salida de corriente AC sinusoidal que se obtiene en el lado alterno del convertidor puede ser controlada en magnitud, frecuencia y fase.

Debido al hecho de que las corrientes en el lado AC del convertidor presentan un alto di/dt , un filtro capacitivo debe estar conectado en los terminales del lado AC del PWM-CSC en aplicaciones inductivas.

Un correcto funcionamiento del PWM-CSC debe cumplir dos limitaciones principales: (a) en el lado AC del convertidor hay conectados capacitores, por lo tanto estos no pueden estar en cortocircuito lo que implica que uno de los interruptores superiores (S_1 , S_3 o S_5) y un interruptor inferior (S_4 , S_6 o S_2) de la figura 3.1 deben estar cerrados en algún momento y (b) en el lado DC del convertidor existe una fuente de corriente la cual no puede quedar en circuito abierto; por lo tanto, debe al menos haber un interruptor superior (S_1 , S_3 o S_5) y un interruptor inferior (S_4 , S_6 o S_2) que estén cerrados en todo momento. Las limitaciones se pueden resumir afirmando que en cualquier momento, solo un interruptor de la parte superior

y inferior deben estar cerrados.

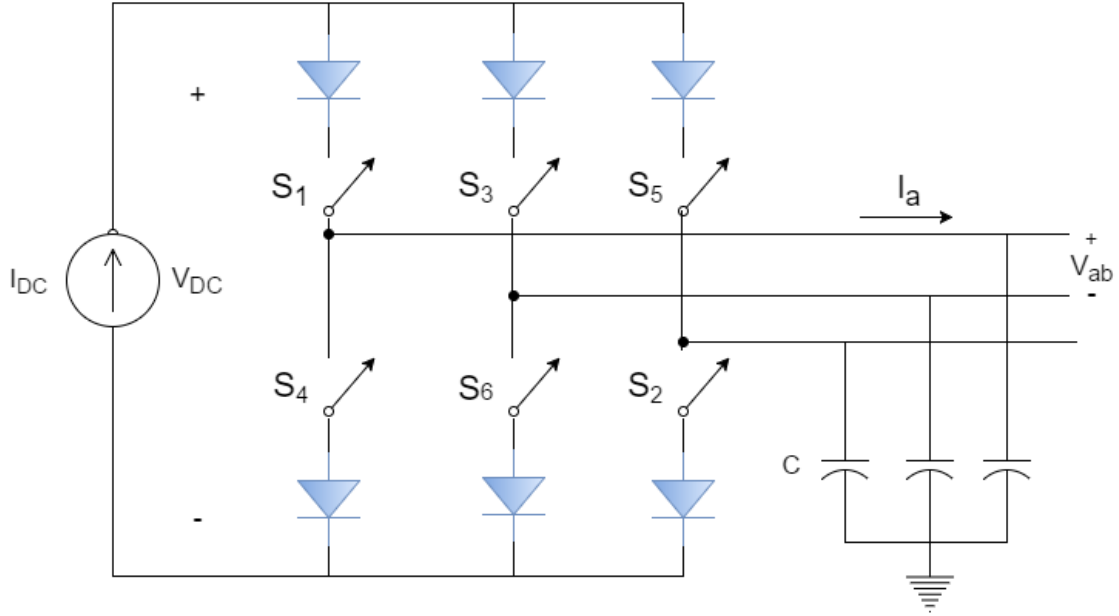


Figura 3.1: Topología trifasica del PWM-CSC

Hay nueve estados válidos en los PWM-CSC trifásicos (ver tabla 3.1). Los estados 7, 8 y 9 producen corrientes de línea AC con valor de cero. En este caso, el puente de corriente DC avanza independientemente a través de cualquiera de los interruptores S_1 y S_4 , interruptores S_3 y S_6 , o interruptores S_5 y S_2 , es decir que la fuente de corriente DC se encuentra en cortocircuito. Los estados restantes (1 a 6 en la tabla 3.1) producen corrientes de línea de salida AC con valores diferentes a cero. Con el fin de generar ondas de corriente de línea AC, el inversor debe obligatoriamente moverse de un estado a otro. De este modo, las corrientes de línea resultantes consisten en valores discretos de corriente, los cuales son I_{DC} , 0, y $-I_{DC}$. Para generar los estados validos del PWM-CSC es necesario aplicar técnicas de modulación con el fin de generar las ondas de corriente AC.

Existen varias técnicas de modulación que se encargan de los requerimientos especiales de los PWM-CSC. Estas técnicas son clasificadas dentro de tres categorías: (1) Técnicas de Modulación por ancho de pulso o por sus siglas en ingles PWM, (2) la eliminación selectiva de armónicos y (3) las técnicas basadas en el espacio vectorial o por su siglas en ingles SVM (*Space vector modulation*). Aunque estas técnicas son diferentes, generan señales reguladas que satisfacen los requerimientos especiales de los PWM-CSC.

Estado	Interruptores						I_A	I_B	I_C
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6			
1	<i>on</i>	<i>on</i>	—	—	—	—	I_{DC}	0	$-I_{DC}$
2	—	<i>on</i>	<i>on</i>	—	—	—	0	I_{DC}	$-I_{DC}$
3	—	—	<i>on</i>	<i>on</i>	—	—	$-I_{DC}$	I_{DC}	0
4	—	—	—	<i>on</i>	<i>on</i>	—	$-I_{DC}$	0	I_{DC}
5	—	—	—	—	<i>on</i>	<i>on</i>	0	$-I_{DC}$	I_{DC}
6	<i>on</i>	—	—	—	—	<i>on</i>	I_{DC}	$-I_{DC}$	0
7	<i>on</i>	—	—	<i>on</i>	—	—	0	0	0
8	—	—	<i>on</i>	—	—	<i>on</i>	0	0	0
9	—	<i>on</i>	—	—	<i>on</i>	—	0	0	0

Tabla 3.1: Estados validos en los interruptores para un PWM-CSC trifásico

3.2. Modulación PWM

La modulación del PWM-CSC es mucho mas compleja que la del VSC. Esta requiere de compuertas con el fin de evitar un circuito abierto en la bobina superconductora. Sea comprobado que las técnicas de modulación por ancho de pulso PWM que fueron recientemente desarrolladas por los VSC trifásicos (inversores trifásicos por fuente de tensión) pueden ser extendidas a PWM-CSC trifásicos.

El circuito que se muestra en la figura 3.2 consiste en un patrón regulado para un PWM-CSC a partir de la modulación desarrollado para un VSC. Como resultado, la corriente de línea suele ser idéntica a la tensión de línea en un VSC por la similaridad que existe en las señal de portador y modulación.

Este circuito está compuesto de un generador de pulso por switcheo (*Switching pulse generator*), un generador de pulso corto (*Shorting pulse generator*), un distribuidor de pulso en corto (*Shorting pulse distributor*), y un combinador de pulso corto y de switcheo (*Switching and shorting pulse combinator*). El circuito básicamente produce las señales reguladas ($[S]_{1\dots 6} = [S_1 \dots S_6]^T$) de acuerdo con una señal portadora i_Δ y con las tres señales moduladoras $[i_c]_{abc} = [i_{ca} i_{cb} i_{cc}]^T$. Por lo tanto, cualquier conjunto de señales moduladas, las cuales al combinarse resultan en un conjunto de señales sinusoidales línea a línea, que satisface los requerimientos para un patrón de corriente de línea sinusoidal. Ejemplos de tales señales moduladas son las de sinusoidal estándar, sinusoidal con inyección del tercer armónico, trapezoidal, y ondas de zona muerta.

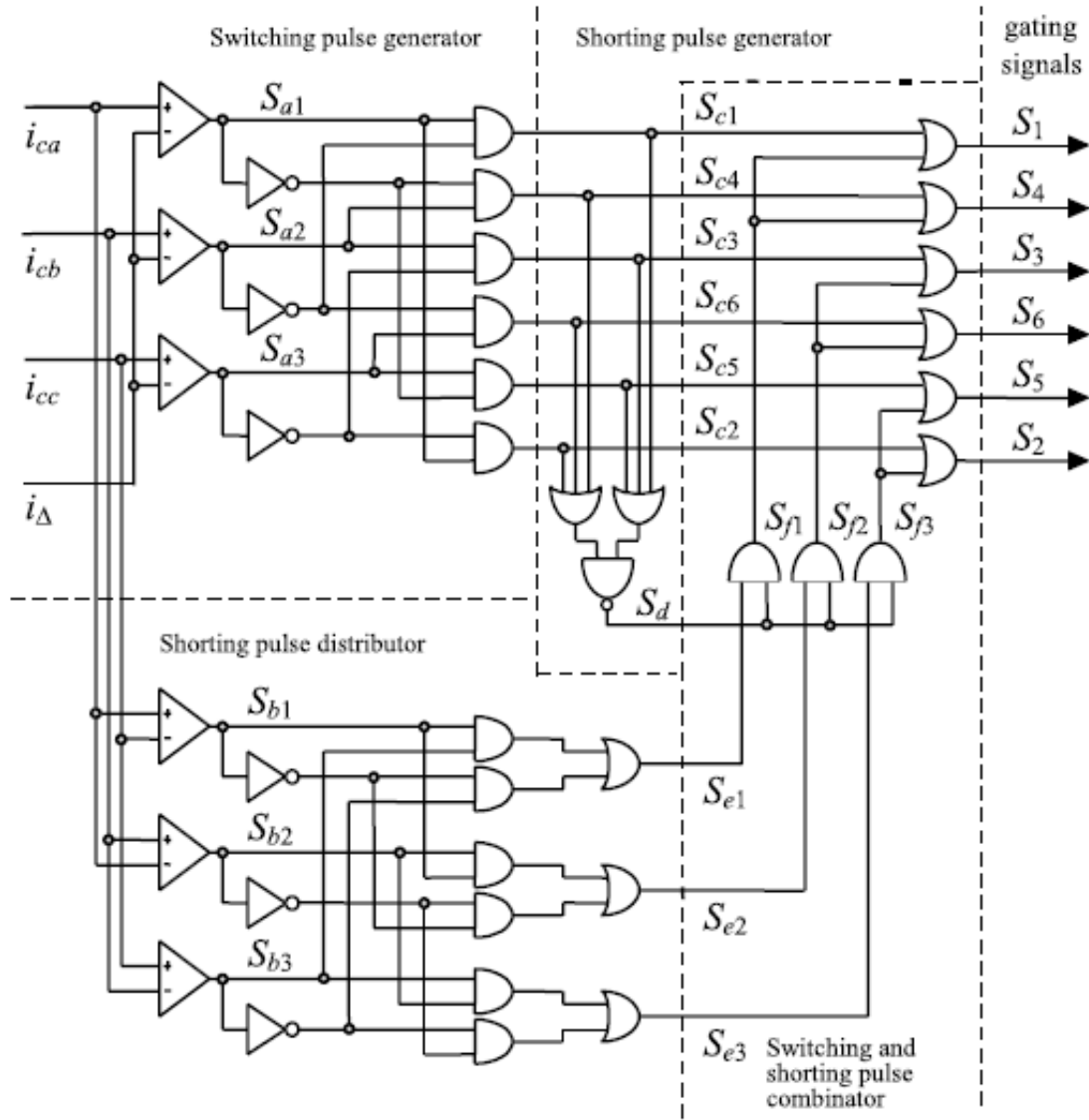


Figura 3.2: Modulación PWM-CSC (tomada de [23])

El primer componente de esta fase (figura 3.2) es el generador de pulso de intercambio,

donde las señales $[S_a]_{123}$ son generadas de acuerdo a:

$$[S_a]_{123} = \begin{cases} \text{Alto} = 1 \rightarrow \text{si } [ic]_{abc} > i_{\Delta} \\ \text{Bajo} = 0 \rightarrow \text{De otra manera} \end{cases} \quad (3.1)$$

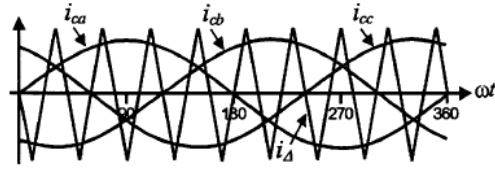
Las salidas del generador de pulso de switcheo son las señales $[Sc]_{1\dots 6}$, las cuales son básicamente las señales reguladas del PWM-CSC sin los pulsos cortos. Estas son necesarias para sobrellevar el puente de corriente dc (I_{DC}) cuando las corrientes de salida ac en cero son requeridas. La tabla 3.2 muestra la tabla verdad de $[Sc]_{1\dots 6}$ para todas las combinaciones de sus entradas $[Sa]_{123}$. Puede ser claramente visto que un interruptor de la parte superior y un interruptor de la parte inferior esta encendido, lo cual satisface la primera restricción de las señales reguladas como se expuso anteriormente.

S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	Interruptores de la parte superior			Interruptores de la parte inferior		
			S_{e1}	S_{e2}	S_{e3}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0

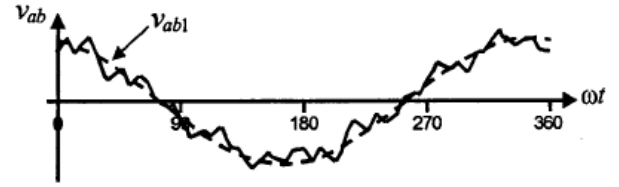
Tabla 3.2: Tabla de verdad para la etapa del generador de pulsos de switcheo.

A fin de satisfacer la segunda restricción, el pulso corto ($Sd = 1$) es generado (el generador de pulso corto (figura 3.2) cuando los interruptores de la parte superior ($S_{c1} = S_{c3} = S_{c5} = 0$) o los interruptores de la parte inferior ($S_{c4} = S_{c6} = S_{c2} = 0$) están abiertos. Entonces, este pulso se añade (usando compuertas OR) a una sola pierna del PWM-CSC (ya sea para los interruptores S_1 y S_4 , S_3 y S_6 , o S_5 y S_2) por medio del combinador de pulso corto y de switcheo. Las señales generadas por el generador de pulso corto $[Se]_{123}$ garantizan que: (1) una sola pierna del PWM-CSC este cortocircuitada, ya que solo una de las señales es alta en algún momento y (2) hay una distribución uniforme del pulso corto, como $[Se]_{123}$ es ALTO por 120° en cada periodo. Esto asegura que el valor cuadrático medio (rms) de corriente es igual en todas las piernas.

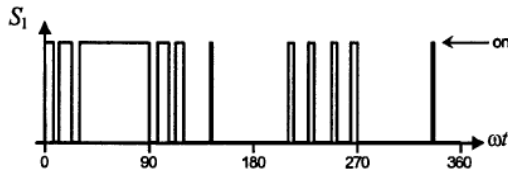
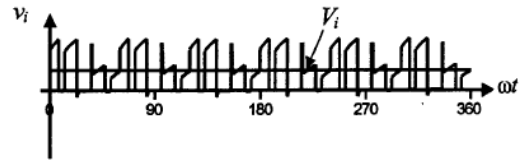
La figura 3.3 muestra la señal portadora triangular i_{Δ} y las señales sinusoidales moduladas. Estas son usadas para generar la modulación por ancho de pulso del vector de espacio o control vectorial SPWM, por medio del circuito de la (figura 3.2).



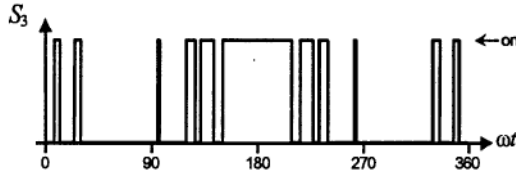
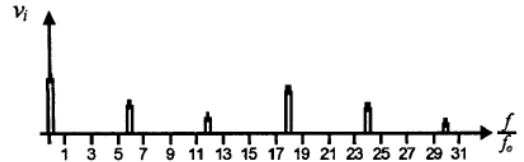
(a) Señal portadora y moduladora.



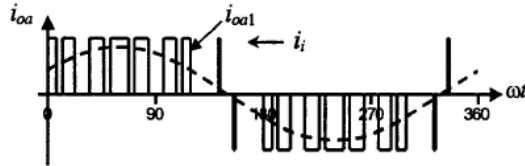
(f) Voltaje de salida AC.

(b) Estado del Interruptor S_1 .

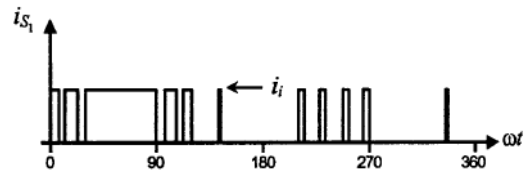
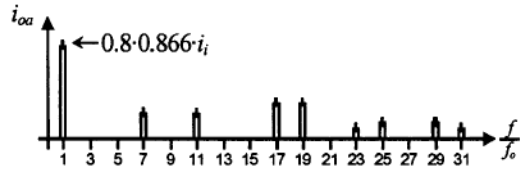
(g) Voltaje DC.

(c) Estado del Interruptor S_3 .

(h) Espectro de voltaje DC.



(d) Corriente de salida AC.

(i) Corriente en el interruptor S_1 .

(e) Espectro de corriente de salida AC.

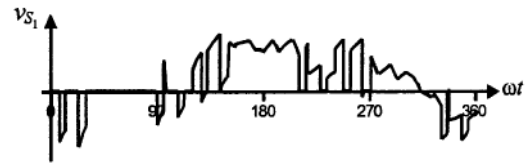
(j) Voltaje en el interruptor S_1 .

Figura 3.3: Formas de onda ideales para la modulación por ancho de pulso del vector de espacio SPWM ($ma = 0,8$ y $mf = 9$) (tomada de [23]).

Los armónicos de la corriente de salida AC aparecen en frecuencias normalizadas f_h centradas alrededor de m_f y sus múltiplos específicamente, en:

$$h = l \cdot m_f \pm k \rightarrow l = 1, 2, 3, \dots \quad (3.2)$$

Donde $l = 1, 3, 5, \dots$ para $k = 2, 4, 6, \dots$ y $l = 2, 4, 6, \dots$ para $k = 1, 5, 7, \dots$, de tal manera que h no es múltiplo de tres. Por lo tanto, los armónicos estarán en $m_f \pm 2, m_f \pm 4, \dots, 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5, \dots, 3m_f \pm 2, 3m_f \pm 4, \dots, 4m_f \pm 1, 4m_f \pm 5, \dots$. Los armónicos en el puente de voltaje DC en frecuencias de carga dadas por:

$$h = l \cdot m_f \pm k \pm 1 \rightarrow l = 1, 2, 3, \dots \quad (3.3)$$

La amplitud máxima de la salida de corriente fundamental de línea AC es $i_{oa1} = \sqrt{3}i_i/2$ y por lo tanto se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\hat{i}_{oa1} = m_a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_i \rightarrow 0 < m_a < 1 \quad (3.4)$$

Para aumentar aún más la amplitud de corriente, se puede aprovechar la sobremodulación. En esta región, el rango de la corriente fundamental de línea es:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_i < \hat{i}_{oa1} = \hat{i}_{ob1} = \hat{i}_{oc1} < \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_i \quad (3.5)$$

3.3. Modelo Promediado

Un modelo promediado permite analizar de forma continua las variables eléctricas de convertidor, reduciendo el tiempo de cómputo con lo cual permite realizar un análisis más rápido en cuanto al comportamiento eléctrico del PWM-CSC.

El modelo promediado PWM-CSC se considera que la potencia en el lado DC es igual a la potencia en lado AC, es decir que no hay pérdidas en la conmutación y en los materiales semiconductores que son relativamente pequeñas alrededor de un 3% de la potencia total del sistema. Además, se debe suponer que la frecuencia de la portadora tiene a infinito, esto con el fin de que las variables del sistema obtenidas con este modelo sean similares con respecto al modelo exacto del PWM-CSC, por lo tanto, las constantes conmutaciones realizadas por los IGBTs quedan de alguna forma eliminada.

Partiendo de la ecuación :

$$P_{DC} = P_{AC} \quad (3.6)$$

Ampliando la expresión (3.6) en términos de sus voltajes y corrientes se tiene:

$$V_{DC}I_{DC} = V_A I_A + V_B I_B + V_C I_C \quad (3.7)$$

donde la corriente fundamental en el lado AC para cada una de las fases esta dado por:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} m_A \\ m_B \\ m_C \end{bmatrix} I_{DC} \quad (3.8)$$

A partir de las ecuaciones (3.7) y (3.8) se obtiene el voltaje DC del lado continuo del convertidor:

$$V_{DC} = m_A V_A + m_B V_B + m_C V_C \quad (3.9)$$

donde:

m_A, m_B, m_C : son los índices de modulación PWM del convertidor.

V_{ABC}, I_{ABC} : son las corrientes y tensiones sinusoidales del lado AC del convertidor.

I_{DC}, V_{DC} : es la corriente y la tension de la bobina SMES.

Por ultimo, las ecuaciones (3.8) y (3.9) permiten llegar al modelo de la Figura 3.4

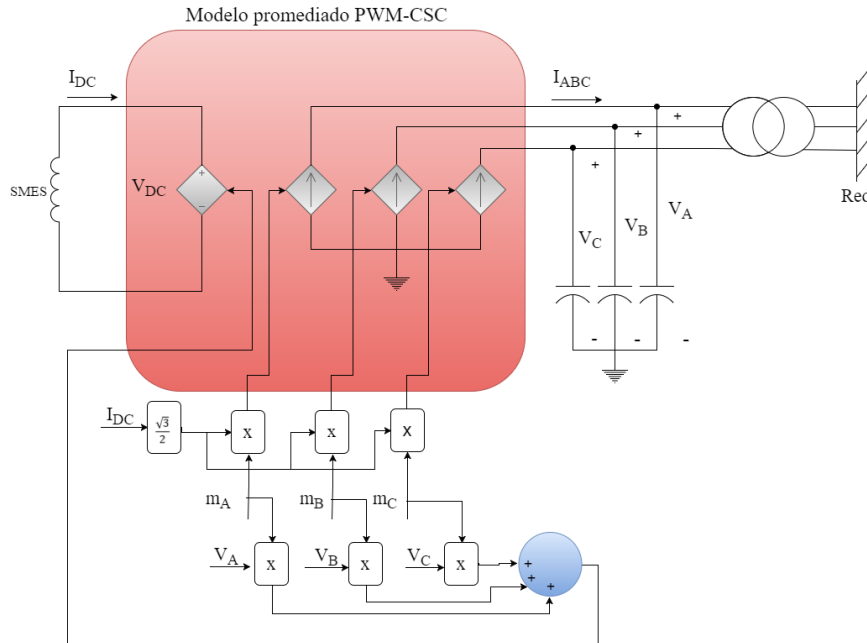


Figura 3.4: Diagrama esquemático del modelo Promediado PWM-CSC

En el lado AC del convertidor hay 3 fuentes de corrientes que dependen del índice de modulación y de la corriente DC. En el lado DC del convertidor se encuentra conectado la bobina SMES donde la tensión depende del índice de modulación y de las tensiones en el lado AC del convertidor.

Capítulo 4

Estrategia de Control

Un control adecuado permite que la unidad SMES absorba o genere energía, con el fin de realizar una compensación al desequilibrio energético generado por diferentes perturbaciones en el sistema eléctrico, de modo que suprima las oscilaciones Subsíncrona.

La estrategia de control tiene tres etapas: la primera es un control de corriente en el lado DC del convertidor, la segunda es amortiguamiento activo (Active Damping) y por ultimo un control proporcional de frecuencia (Droop).

4.1. Control de la corriente DC del convertidor PWM-CSC.

Para tener un control de la corriente que circula por la bobina superconductora se parte de la energía almacenada en la unidad SMES:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{DC}^2 \quad (4.1)$$

donde la potencia de la unidad SMES esta dada por:

$$P_{DC} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d(I_{DC}^2)}{dt} \quad (4.2)$$

sea:

$$\Delta X = I_{DC}^2 - I_{DCref}^2 \quad (4.3)$$

con I_{ABC} aproximadamente constante y por tanto:

$$\frac{d\Delta X}{dt} = \frac{d(I_{DC}^2)}{dt} \quad (4.4)$$

Reemplazando (4.4) en (4.2) se obtiene (4.5):

$$P_{DC} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d(\Delta X)}{dt} \quad (4.5)$$

De otro lado la potencia activa del lado AC del convertidor aplicando la transformada de Park se tiene:

$$P_{AC} = Vd \cdot Id \cdot + Vq \cdot Iq \quad (4.6)$$

Consideremos un PLL (*Phase-Locked Loop*) sincronizado de manera que el componente q del sistema coordinado 0dq sea cero

$$Vq = 0 \quad (4.7)$$

reemplazando (4.7) en (4.6) se obtiene:

$$P_{AC} = Vd \cdot Id \quad (4.8)$$

Se propone un control PI de la forma (4.9):

$$P = Kp \cdot \Delta X + Ki \cdot \int \Delta X \quad (4.9)$$

donde:

Kp es la constante proporcional.

Ki es la constante integral del control.

ΔX es el error.

Es fácil demostrar que este tipo de control lleva a la corriente a la referencia deseada. Por lo tanto Igualando (4.9) y (4.5) se obtiene la siguiente expresión (4.10):

$$\frac{L}{2} \cdot \left(Kp \cdot \Delta X + ki \cdot \int \Delta X \right) = \frac{d\Delta X}{dt} \quad (4.10)$$

Para obtener la señal de control o índice de modulación del PWM-CSC se parte de la ecuación (4.11):

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [T]_{Park}^t \cdot \begin{bmatrix} Id \\ Iq \\ Io \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

donde:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \begin{bmatrix} m'_A \\ m'_B \\ m'_C \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

reemplazando (4.12) en (4.11) se obtiene (4.13):

$$\begin{bmatrix} m'_A \\ m'_B \\ m'_C \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot I_{DC}} \cdot [T]_{Park}^t \cdot \begin{bmatrix} Id \\ Iq \\ Io \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Se puede asumir I_{DC} es constante en el lazo directo del control puesto que no tiene efecto en la dinámica del índice de modulación que es obtenido a partir del control PI, por lo tanto, se obtiene (4.14):

$$\begin{bmatrix} m'_A \\ m'_B \\ m'_C \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot I_{DCnom}} \cdot [T]_{Park}^t \cdot \begin{bmatrix} Id \\ Iq \\ Io \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

siendo $Iq = 0$ y $Io = 0$ se obtiene (4.15):

$$m_d = \frac{Id}{I_{DCnom}} \quad (4.15)$$

Remplazando (4.15) en (4.14) se obtiene (4.16) que es la señal de control del PWM-CSC:

$$\begin{bmatrix} m'_A \\ m'_B \\ m'_C \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot I_{DCnom}} \cdot [T]_{Park}^t \cdot \begin{bmatrix} m_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Este control se muestra en forma de diagrama bloques en la figura 4.1.

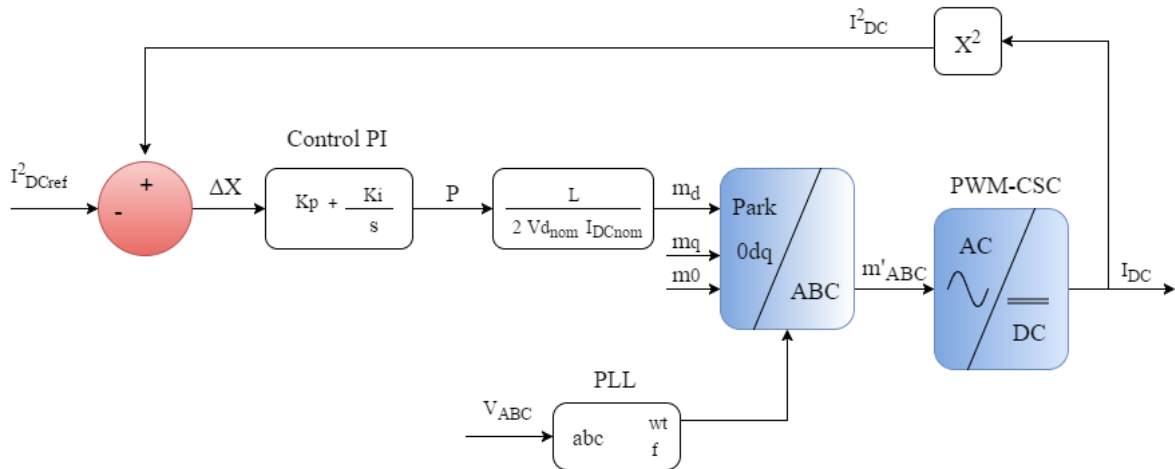


Figura 4.1: Diagrama de bloques del control de corriente I_{DC} en el sistema SMES

4.2. Amortiguamiento Activo(Active Damping)

Otra parte fundamental del control propuesto para mitigar el fenómeno de Resonancia Subsíncrona está relacionado con el amortiguamiento activo. Este me permite atenuar los cambios bruscos de la potencia entregada por la unidad SMES. Este cambio de potencia se debe a que el fenómeno oscilatorio genera pares transitorios, creando un cambio brusco en las magnitudes de la corriente que tenderán a oscilar a frecuencias naturales del sistema mecánico.

Los problemas de estabilidad en sistemas eléctricos están estrechamente relacionados con el intercambio de energía entre diferentes elementos de la red. Una resistencia conectada en paralelo puede disipar el exceso de energía y por tanto dar amortiguamiento a las oscilaciones de potencia. Esto se puede implementar físicamente en forma de un Breaking-Resistor.

Sin embargo, una unidad SMES puede actuar de una forma similar creando una resistencia ficticia que solo entraría a operar cuando es necesaria. Este concepto lo denominamos active damping. En principio el concepto no es nuevo, ya que se ha aplicado en convertidores matriciales para disminuir efectos de resonancias en aplicaciones de generación eólica. Este concepto no ha sido implementado en aplicaciones de SMES.

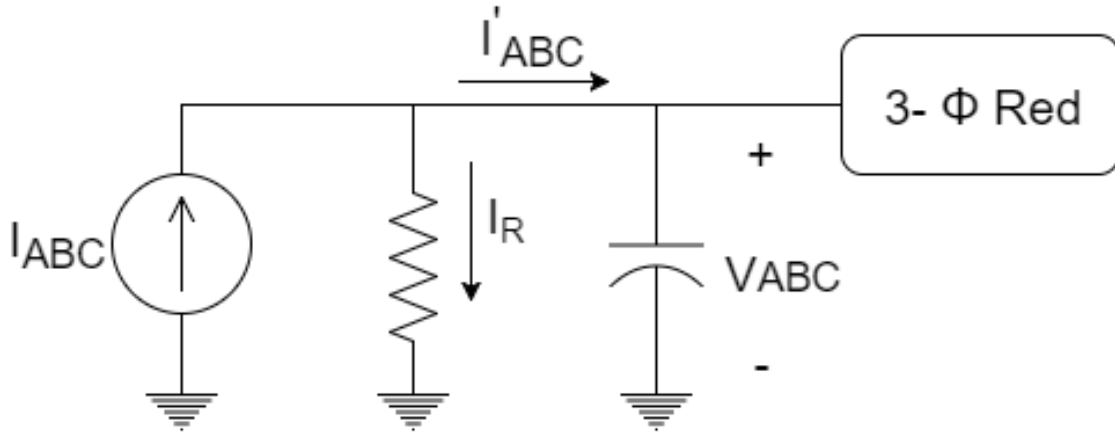


Figura 4.2: Representación monofásica del lado AC del PWM-CSC.

Al incluir una resistencia trifásica en el lado AC de convertidor, ayuda amortiguar cambios bruscos de potencia. Se demuestra que partir de la modulación PWM se puede crear una resistencia ficticia logrando los mismos resultados que una real a diferencia no se genera pérdidas en el sistema en estado estacionario.

La figura 4.2 muestra el circuito equivalente monofásico del lado AC del convertidor en el cual se calcula el nuevo índice de modulación a partir de una resistencia ficticia conectada en el lado AC del PWM-CSC y del índice de modulación previamente calculado en la subsección 4.1.

Aplicando la primera ley de Kirchhoff se tiene (4.17)

$$I'_{ABC} = I_{ABC} - I_R \quad (4.17)$$

donde:

$$I_R = \frac{V_{ABC}}{R} \quad (4.18)$$

Retomando la ecuación (4.12) y (4.18) y remplazando en (4.17) se obtiene (4.19):

$$I'_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m'_{ABC} \cdot I_{DC} - \frac{V_{ABC}}{R} \quad (4.19)$$

Dividiendo (4.19) en ambos lados de la igualdad por I_{DC} , se obtiene (4.20):

$$\frac{I'_{ABC}}{I_{DC}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m'_{ABC} - \frac{V_{ABC}}{R \cdot I_{DC}} \quad (4.20)$$

Reescribiendo (4.20) en terminos del indice de modulación, se tiene (4.21):

$$m_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m'_{ABC} - m''_{ABC} \quad (4.21)$$

donde:

R es la resistencia de amortiguamiento activo del control.

m_{ABC} es la señal de control del PWM-CSC.

A partir de las ecuaciones de las secciones 4.1 y 4.2, se obtiene el diagrama de bloques del control de la corriente de la unidad SMES como se muestra en la figura 4.3.

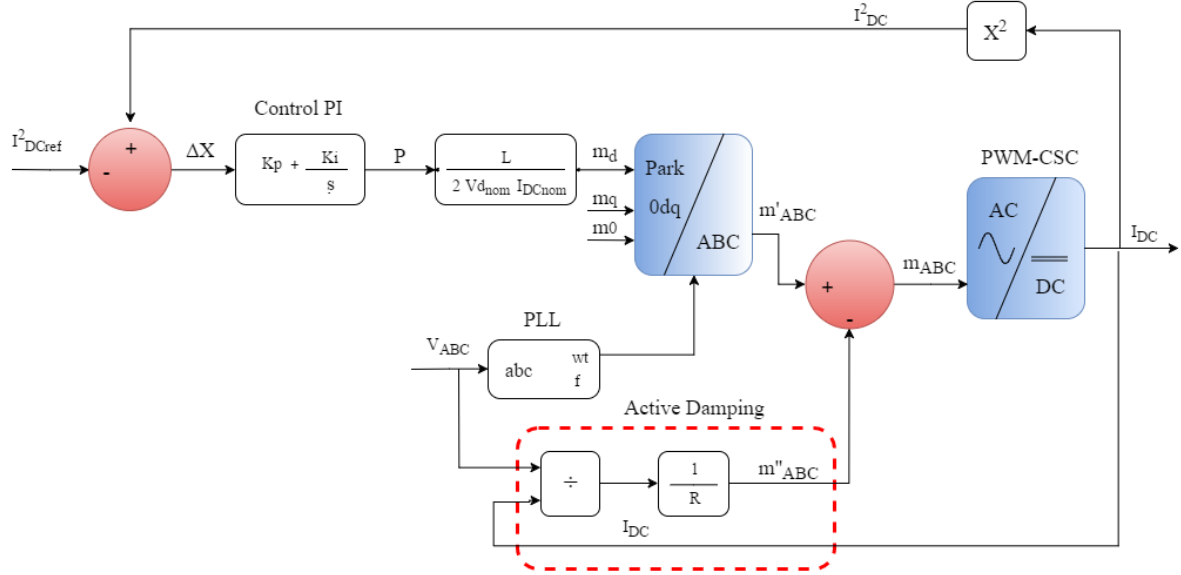


Figura 4.3: Diagrama de bloques del control de corriente I_{DC} y amortiguamiento activo en el sistema SMES.

4.3. Control de Frecuencia(Droop)

Esta parte del control se basa en la señal de la desviación de la velocidad del rotor, con el fin de crear un par amortiguante en la máquina. Esta etapa es similar al control primario del esquema clásico de AGC(Control automático de Generación) en sistemas de potencia.

Este se obtiene a partir de la carga y descarga de energía de la unidad SMES de tal manera que si se llega a presentar el fenómeno de Resonancia Subsíncrona pueda amortiguar el desequilibrio energético causado por el cambio brusco de la potencia activa oscilante del generador. Por lo tanto, la potencia amortiguante está dada por (4.22):

$$P_A = \zeta \cdot (\omega - \omega_{ref}) \quad (4.22)$$

Sea:

$$\omega - \omega_{ref} = \Delta\omega \quad (4.23)$$

donde:

$\Delta\omega$ es la desviación de la velocidad del rotor.

ζ es el factor o coeficiente de amortiguamiento(pu).

Igualando (4.22) con la potencia entregada por la unidad SMES se obtiene (4.24):

$$P_A = P_{DC} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_{DC}^2}{dt} \quad (4.24)$$

donde:

L es la inductancia de la unidad SMES.

I_{DC} es la corriente que circula por la unidad SMES. sea:

$$I_{DC}^2 - I_{DCnom}^2 = \Delta X \quad (4.25)$$

con I_{DCnom} constante, por lo tanto:

$$\frac{d(\Delta X)}{dt} = \frac{dI_{DC}^2}{dt} \quad (4.26)$$

Remplazando (4.26) y (4.24) en (4.23) se obtiene (4.27):

$$\zeta \cdot (\omega - \omega_{ref}) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d(\Delta X)}{dt} \quad (4.27)$$

Con las ecuaciones descritas anteriormente se obtiene el diagrama de bloques del control de frecuencia (Droop) como se muestra en la figura 4.4.

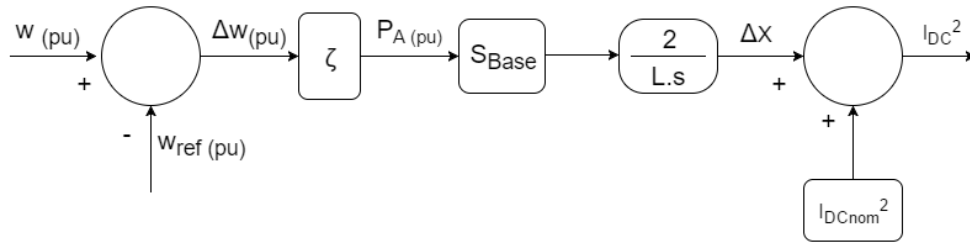


Figura 4.4: Diagrama de bloque de control de frecuencia.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Validación del modelo promediado PWM-CSC

En la figura 5.1 muestra el sistema en estudio. Para que PWM-CSC funcione como un rectificador o inversor es necesario utilizar un elemento de enlace DC una fuente de corriente, por lo tanto, la unidad SMES será remplazado por una fuente de corriente continua o que su configuración cuya inductancia sea relativamente grande ($L \rightarrow \infty$) y una carga R-L en el lado AC del convertidor PWM-CSC para efectos de estudio.

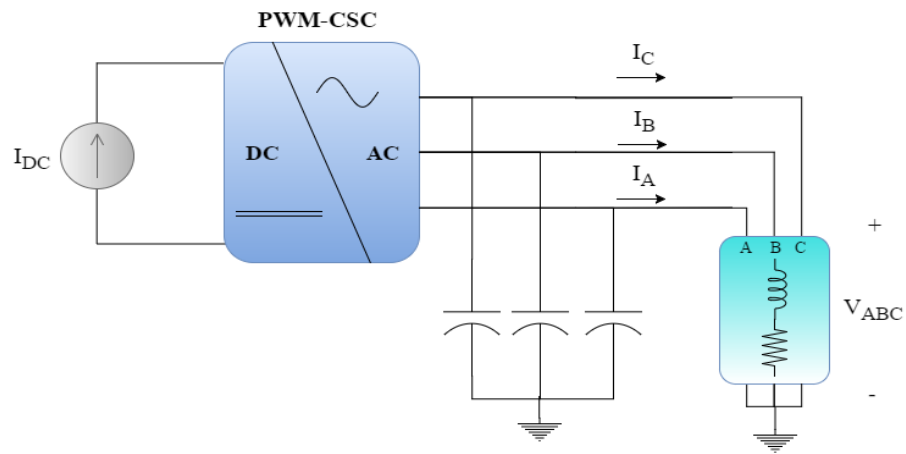


Figura 5.1: Sistema de estudio PWM-CSC con carga R-L.

Para demostrar que el modelo promediado del convertidor se comporta de manera apro-

ximada al modelo exacto se valida mediante simulaciones donde se obtienen las formas de onda de la tensión y corriente en la carga para cada caso. En la figura 5.2 y 5.3 se muestran las señales de corriente en una de las fases de la carga R-L, y las figuras 5.4 y 5.5 representan las formas de onda del voltaje en la carga.

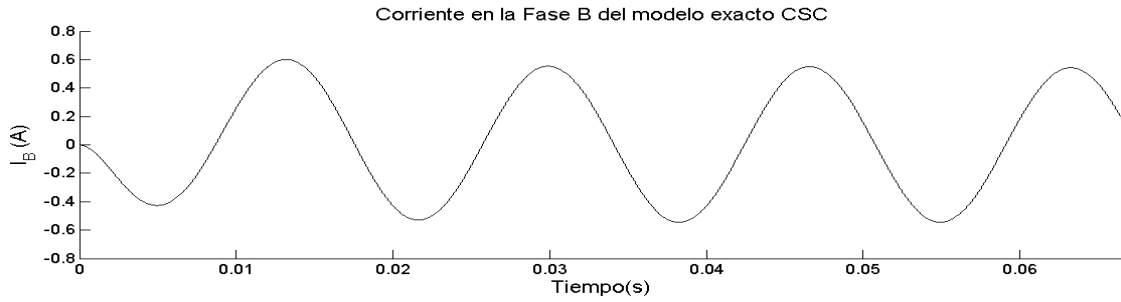


Figura 5.2: Corriente en la fase B de la carga R-L con el modelo exacto del PWM-CSC.

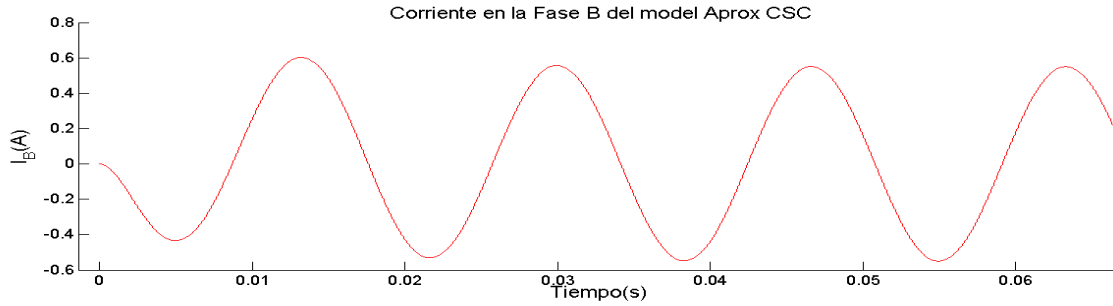


Figura 5.3: Corriente en la fase B de la carga R-L con el modelo promediado del PWM-CSC.

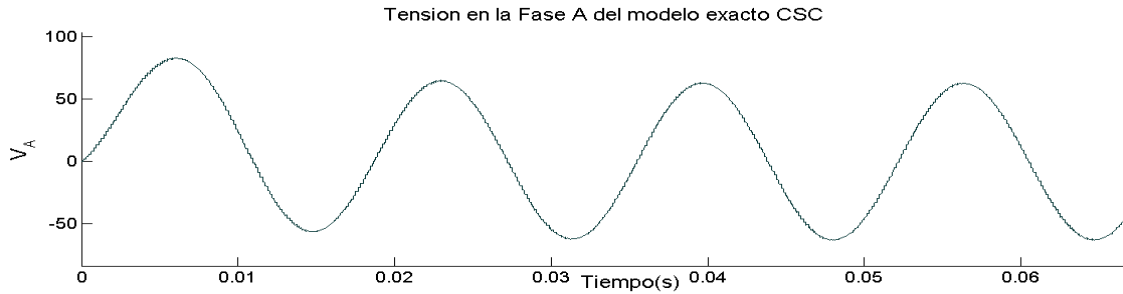


Figura 5.4: Voltaje en la fase A de la Carga R-L con el modelo exacto PWM-CSC.

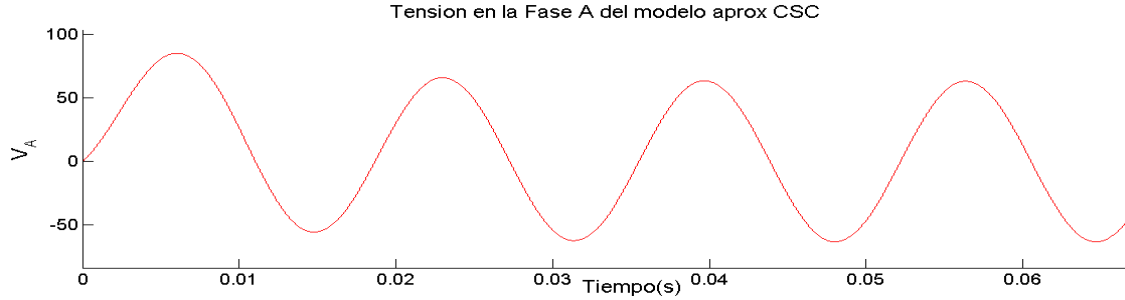


Figura 5.5: Voltaje en la fase A de la Carga R-L con el modelo promediado PWM-CSC.

Si se analiza el espectro de la señal de salida (Voltaje o Corriente) de PWM-CSC exacto, se puede observar que no solo se encuentra presente la componente fundamental, si no que debido a la modulación aparecen otras componentes en frecuencia alrededor de esta, por lo tanto aparece una pequeña diferencia entre la señal de salida del PWM-CSC exacto y del modelo promediado.

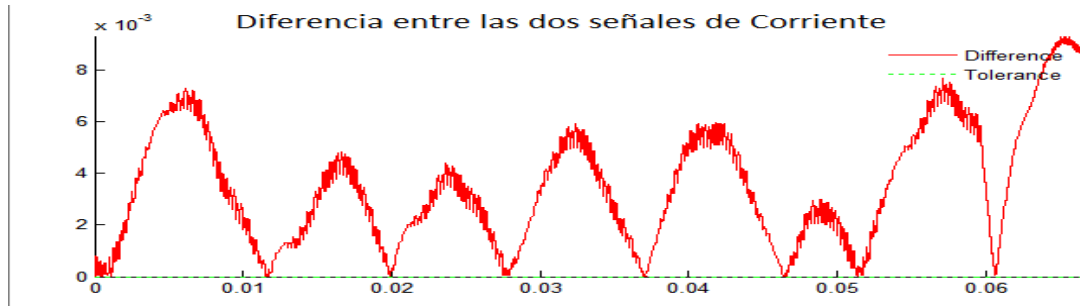


Figura 5.6: Diferencia y tolerancia entre las dos señales de corriente.

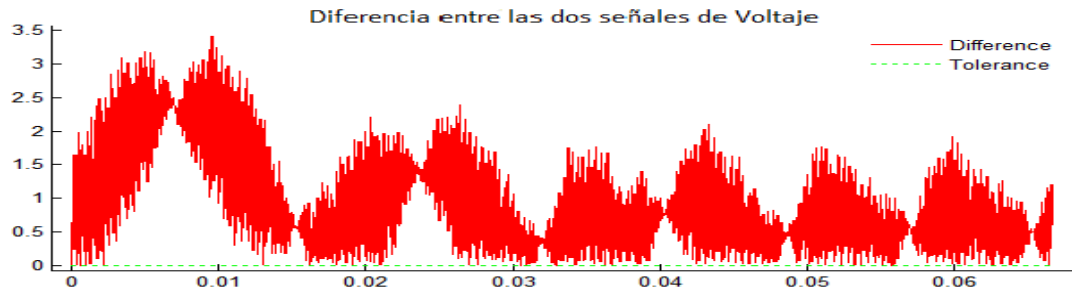
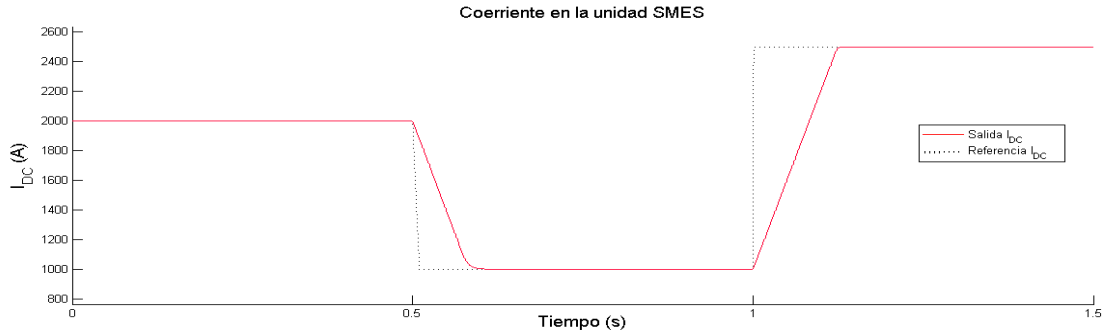


Figura 5.7: Diferencia y tolerancia entre las dos señales de Voltaje.

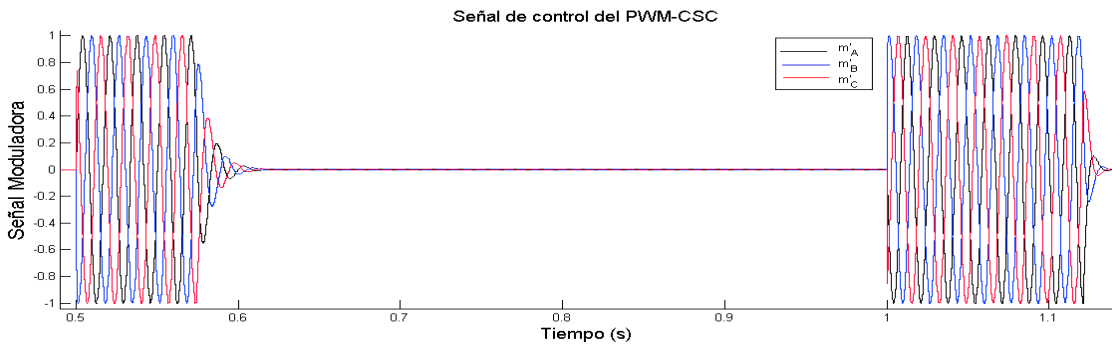
En la figura 5.6 y 5.7 representa la diferencia entre las señales de corriente y tensiones medidas en la carga. A partir de estas gráficas se puede inferir que el modelo promediado del PWM-CSC es una buena aproximación del sistema.

5.2. Validación del control de la corriente DC del convertidor PWM-CSC

En la figura 5.8 demuestra que el control PI (Proporcional Integral) a través de la señal de control (señal moduladora del PWM-CSC) es una buena alternativa para ejercer control en el convertidor de potencia ya que la señal de salida que es la corriente I_{DC} que circula por la bobina SMES sigue la señal de referencia deseada.



(a) Corriente I_{DC} en el sistema SMES



(b) Señal de control

Figura 5.8: Control de la corriente DC del convertidor PWM-CSC

También se puede observar que cuando la señal de control es cero la unidad SMES se encuentra en cortocircuito y cuando esta cambia el sistema SMES esta entregando o absorbiendo energía a la red. La carga y descarga del la unidad SMES depende del sentido de flujo de la potencia que impone el control y de los estados validos del PWM-CSC mencionados en el capitulo 3.

La velocidad de respuesta de este control no solo depende de las constantes propocional K_p y integral K_i del controlador sino también del valor de la inductancia L de la bobina superconductora SMES y de la magnitud de la tension a la cual se encuentra conectada. Es decir entre mayor sea la inductancia L la respuesta del sistema es mas lenta por lo tanto, se requieren niveles altos de tension, por lo contrario si la unidad SMES tiene una inductancia L menor el nivel de tension es mas bajo.

5.2.1. Control sin active Damping

Esta etapa de control no ejerce ningún amortiguamiento a la potencia activa entregada y absorbida por la unidad SMES ya que que al momento de cargar o entregar la energía al sistema, genera una potencia oscilante por un periodo de tiempo muy pequeño como se muestra en la figura 5.9.

Es posible que esta potencia pueda generar problemas en las variables eléctricas del sistema, como es el caso del voltaje medido el lado AC del PWM-CSC como señal de entrada al PLL sea vea afectada. Por lo tanto, la señal de salida puede perder la señal de referencia del controlador y generar posibles inestabilidades en el sistema de potencia dado que el PLL permite sincronizar la unidad SMES al sistema de potencia.

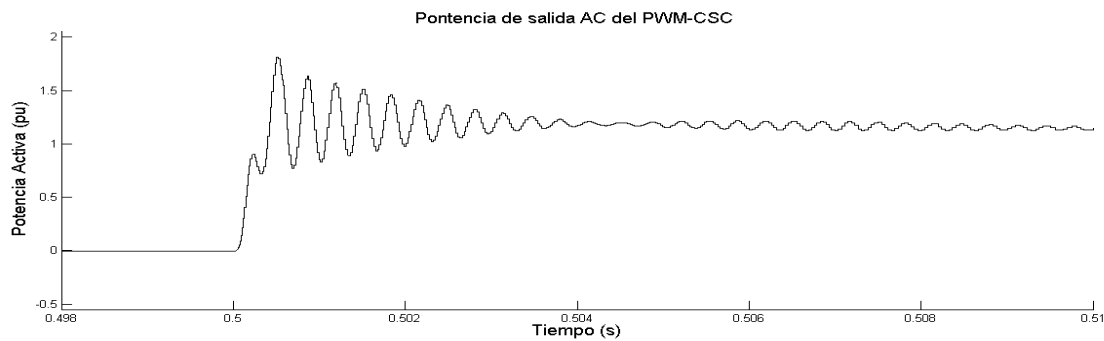


Figura 5.9: Potencia Activa entregada por la unidad SMES

Como ya se ha mencionado anteriormente todo sistema que está conformado por un convertidor de potencia en este caso la unidad SMES si no se ejerce un control adecuado puede

generar resonancia con la red, siempre y cuando exista compensación en serie capacitiva en la línea de transmisión, lo cual origina el fenómeno de resonancia Subsíncrona. Por lo tanto, la estrategia de control es necesario agregarle un amortiguamiento (Active Damping) ya que es necesario atenuar las oscilaciones de potencia entregada por la unidad SMES para evitar una posible inestabilidad de algún modo torsional del generador.

5.2.2. Control con Active Damping

En la figuras 5.10 y 5.11 se observa cambios tanto en la señal de control y en la potencia de salida de la unidad SMES producto de la nueva etapa de control (Active Damping). En la figura 5.11 demuestra que el amortiguamiento activo reduce las oscilaciones de potencia entregadas por la unidad SMES al sistema de potencia en comparación al de la figura 5.9.

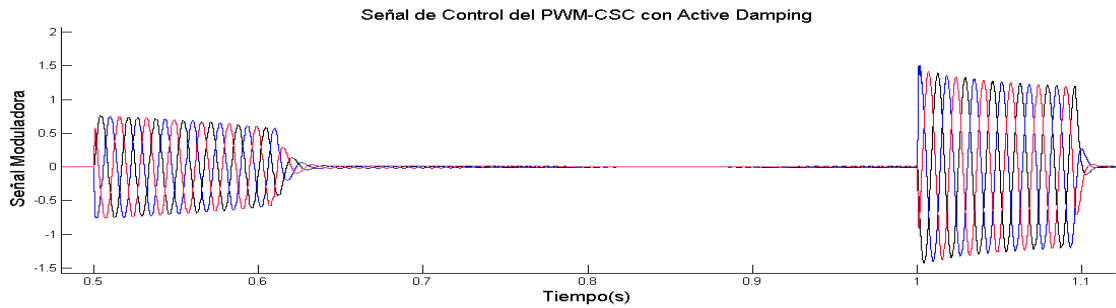


Figura 5.10: Señal de control.

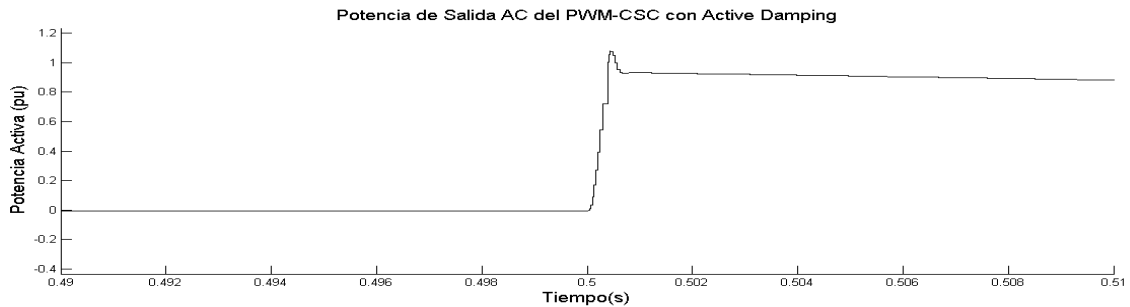


Figura 5.11: Potencia Activa entregada por la unidad SMES.

5.3. Simulación digital de la SSR con y sin la unidad SMES

5.3.1. Sistema en Estudio SSR

En la figura 5.12 se muestra esquemáticamente el segundo modelo de referencia IEEE [?] para el estudio de Resonancia Subsíncrona.

En este modelo, un generador síncrono de 600 MVA/22 kV/60 Hz/3600 rpm está conectado a un bus infinito a través de dos líneas de 500 kV. Una de estas líneas tiene una compensación capacitiva en serie del 55 %. El modelo del eje del turbogenerador consta de tres masas; rotor del generador (GEN), turbina de baja presión (LP) y la turbina de alta presión (HP).

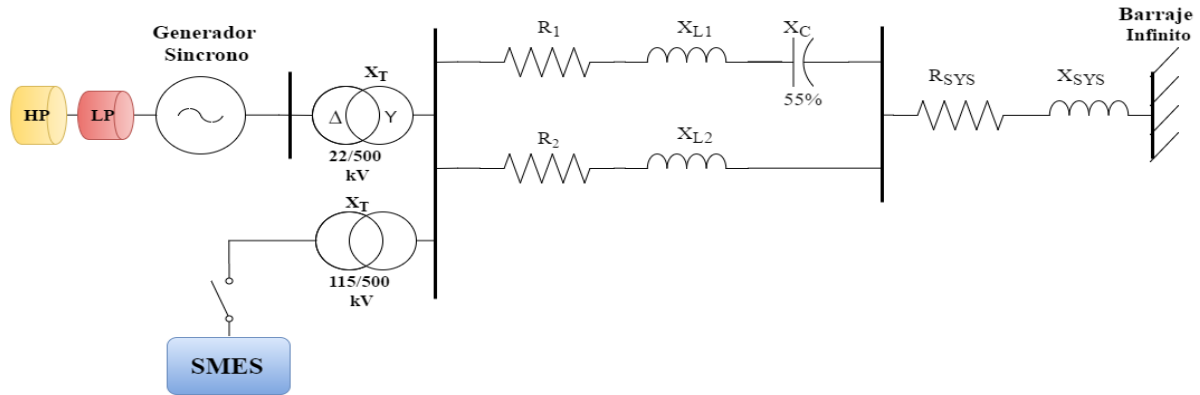
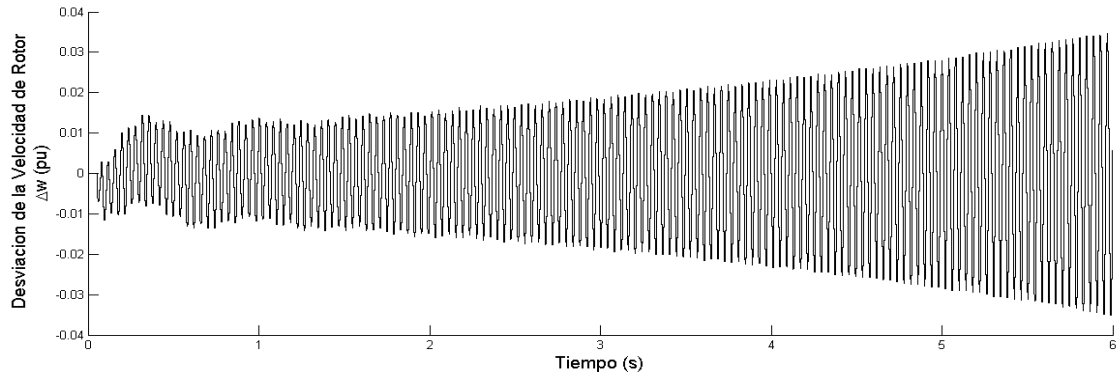


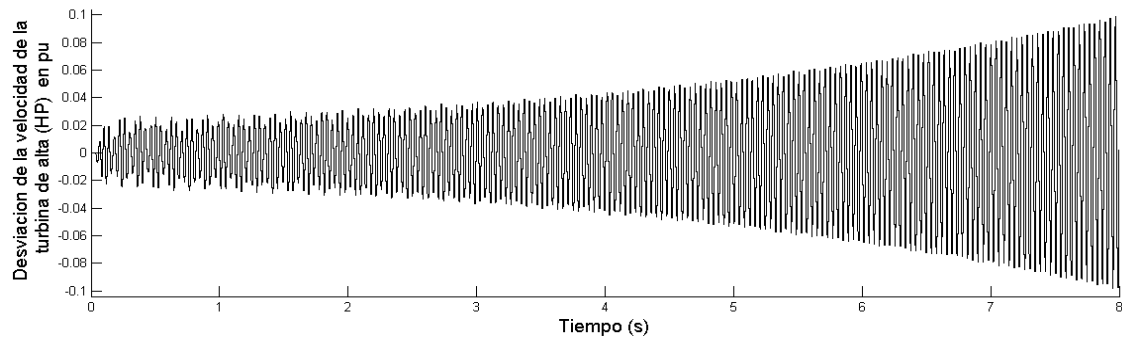
Figura 5.12: Sistema en estudio.

En este modelo se incluye la unidad SMES que se conecta en los terminales del generador síncrono para proporcionar una amortiguación adecuada de los modos oscilatorios torsionales provocados por el fenómeno de Resonancia Subsíncrona. El convertidor PWM-CSC fue implementado mediante un modelo promediado.

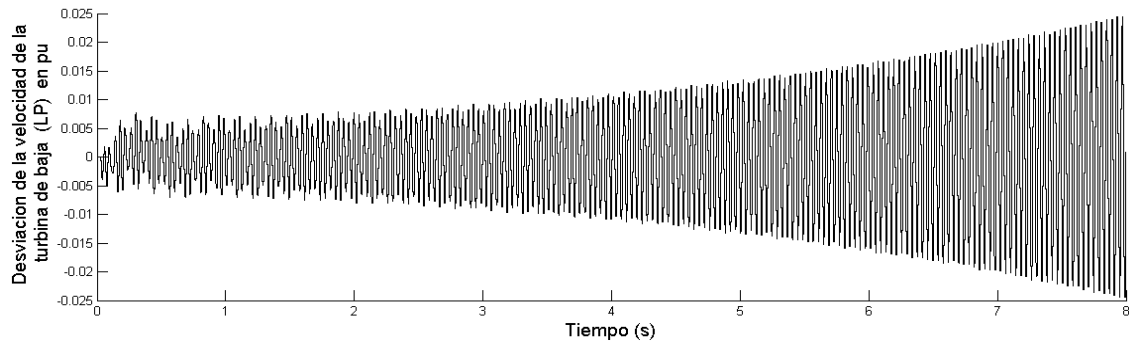
La figura 5.13 y 5.14 muestra la evolución de la desviación de la velocidad del rotor, de la la turbina de alta y baja presión y del par mecánico del generador sin la unidad SMES. La falla trifásica se produjo a los 50 ms y fue despejada 16.9 ms después. Aunque la falla es temporal, los esfuerzos mecánicos siguen aumentando en el generador, producto cambios abruptos en las corrientes transitorias que tienden a oscilar a valores de frecuencias próximas a las naturales del turbogenerador. Se evidencia la necesidad de un elemento que permita mitigar este fenómeno oscilatorio.



(a) Desviación de la velocidad del Rotor sin SMES.

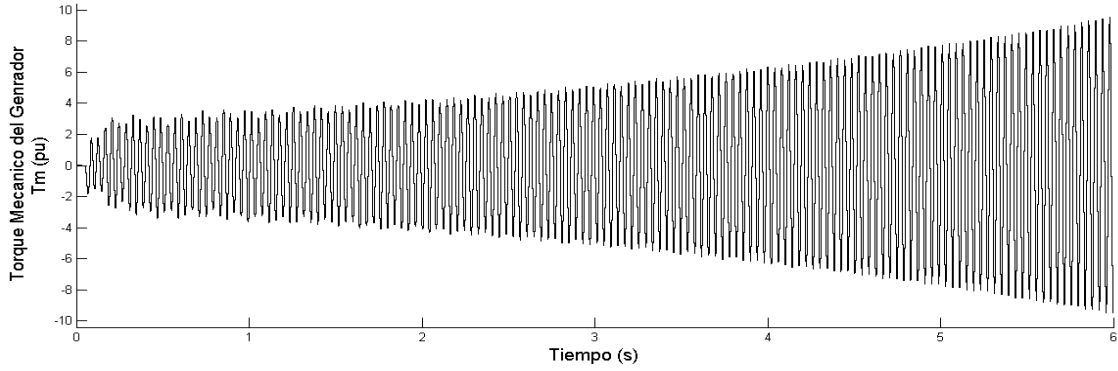


(b) Desviación de la velocidad de la turbina de alta presión sin SMES.

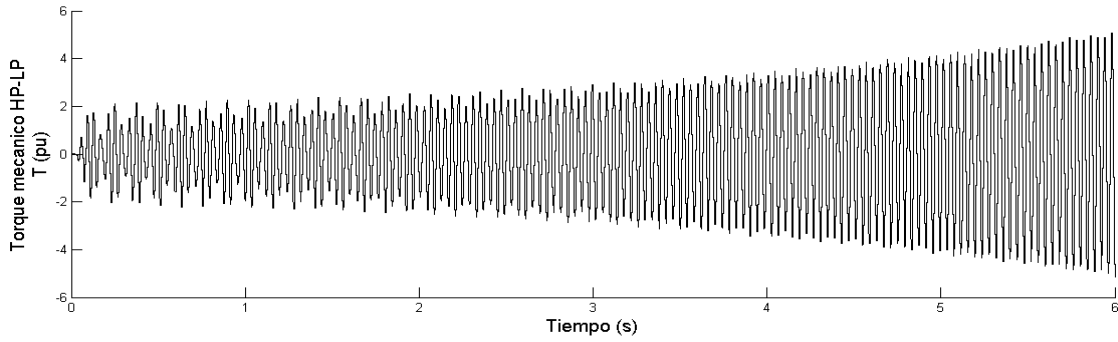


(c) Desviación de la velocidad de la turbina de baja presión sin SMES.

Figura 5.13: Desviación en la velocidad en las diferentes masas acopladas al eje del turbo-
generador sin SMES.



(a) Torque LP-Gen sin SMES.

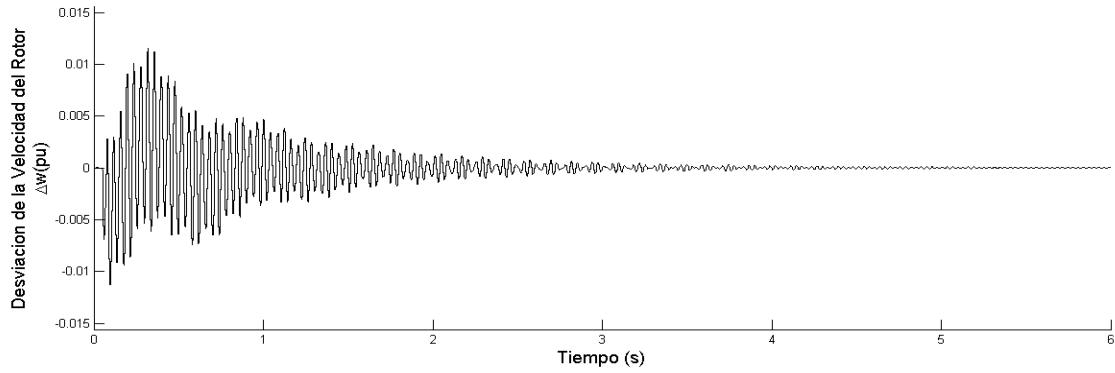


(b) Torque HP-LP sin SMES

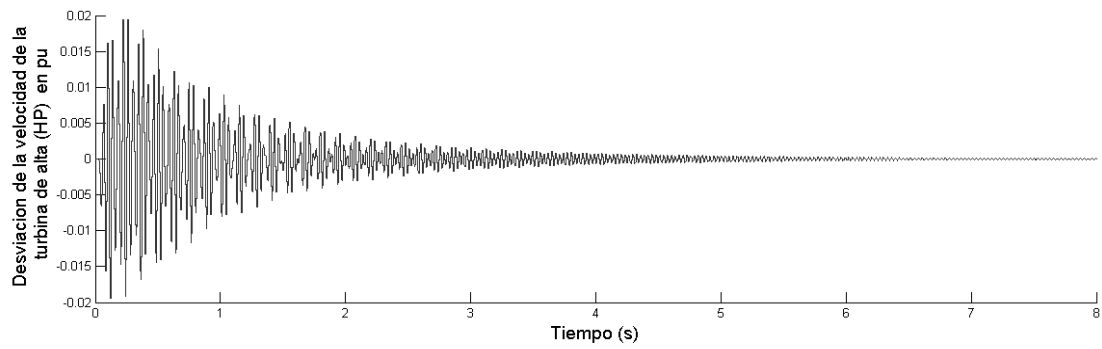
Figura 5.14: Par mecánico entre los acoples del eje de la maquina con la unidad SMES.

5.3.2. Simulación del fenómeno de Resonancia Subsíncrona con SMES en el dominio del tiempo.

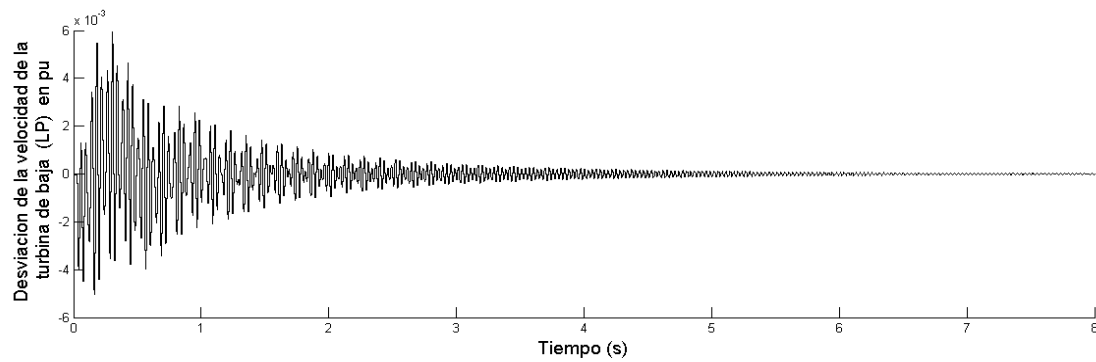
En las figura 5.15 y figura 5.16 se puede observar que cuando, el controlador de la unidad SMES es puesto en servicio, el fallo trifásico que excita los modos de torsión son amortiguados de tal manera que la desviación de la velocidad de las diferentes masas acopladas al eje y el par mecánico del generador reducen sus magnitudes y oscilaciones. Esto permite que el turbogenerador llegue a su zona de estabilidad.



(a) Desviación de la velocidad del Rotor con SMES.

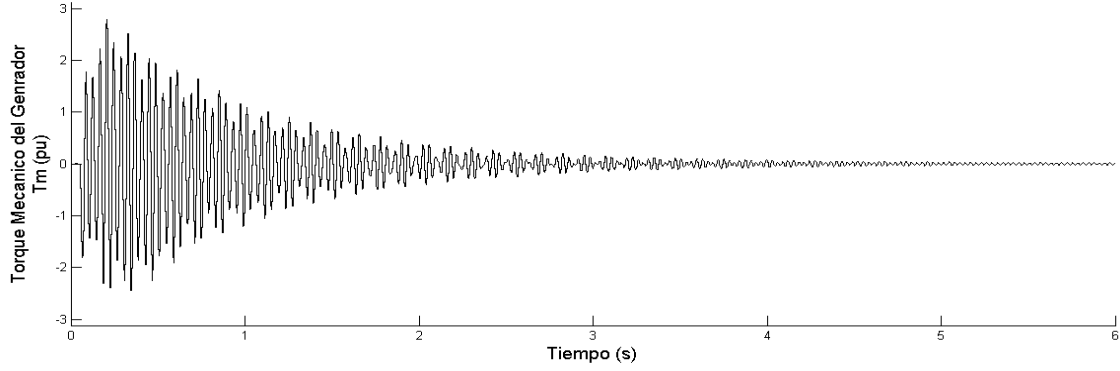


(b) Desviación de la velocidad de la turbina de alta presión con SMES.

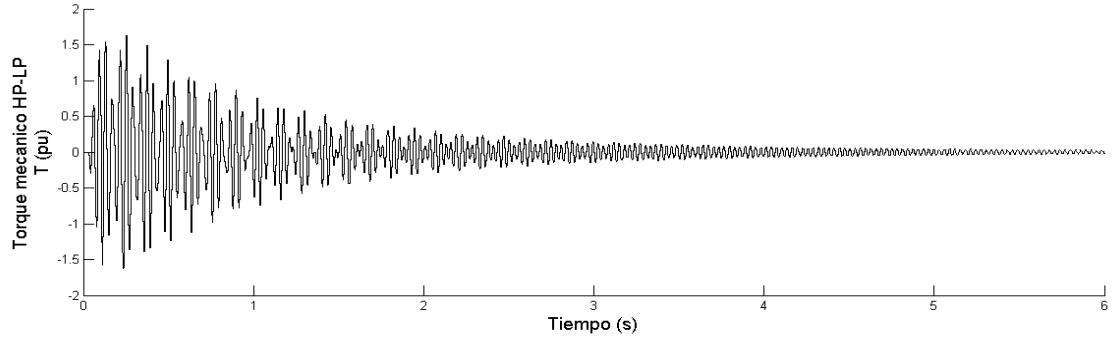


(c) Desviación de la velocidad de la turbina de baja presión con SMES.

Figura 5.15: Desviación en la velocidad en las diferentes masas acopladas al eje del turbogenerador con SMES.



(a) Torque LP-Gen con SMES.



(b) Torque HP-LP con SMES

Figura 5.16: Par mecánico entre los acoplos del eje de la maquina con la unidad SMES.

Además, la unidad SMES puede mejorar en gran medida el margen de estabilidad del generador. También puede demostrarse que el sistema SMES puede reducir significativamente las altas fuerzas de torsión en el eje del turbogenerador a valores de estado estacionario o a sus valores nominales. También se observa una reducción en la desviación de la velocidad del rotor es casi cero.

La potencia intercambiada entre la unidad SMES y la red se muestra en la figura 5.17. Se puede observar que la unidad SMES compensa adecuadamente las oscilaciones de potencia mediante la carga y descarga de la bobina superconductora.

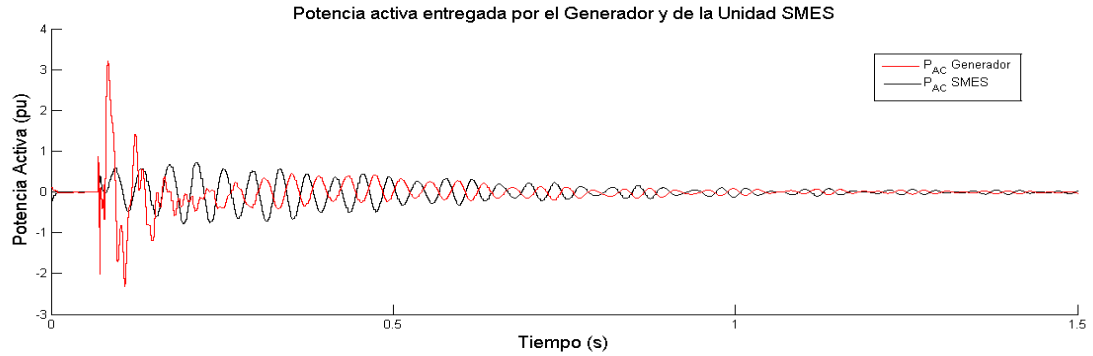


Figura 5.17: Potencia intercambiada entre la unidad SMES y la red

La corriente en la bobina superconductora se muestra en la figura 5.18. La señal de referencia cambia constantemente porque la potencia entregada del turbogenerador (ver figura 5.17) es oscilante, ya que al momento en que se presenta el fenómeno de resonancia Subsíncrona da a lugar a que se presenten corrientes transitorias que tienden a oscilar por debajo de la frecuencia síncrona es por esta razón que la potencia activa entregada por la unidad SMES en el lado AC del convertidor tiene el mismo comportamiento de la potencia del generador con sentido opuesto para equilibrar el desbalance energético causado por dicho fenómeno.

El PWM-CSC permite controlar adecuadamente la corriente de la bobina con el esquema de control propuesto con el propósito de mitigar el fenómeno oscilatorio.

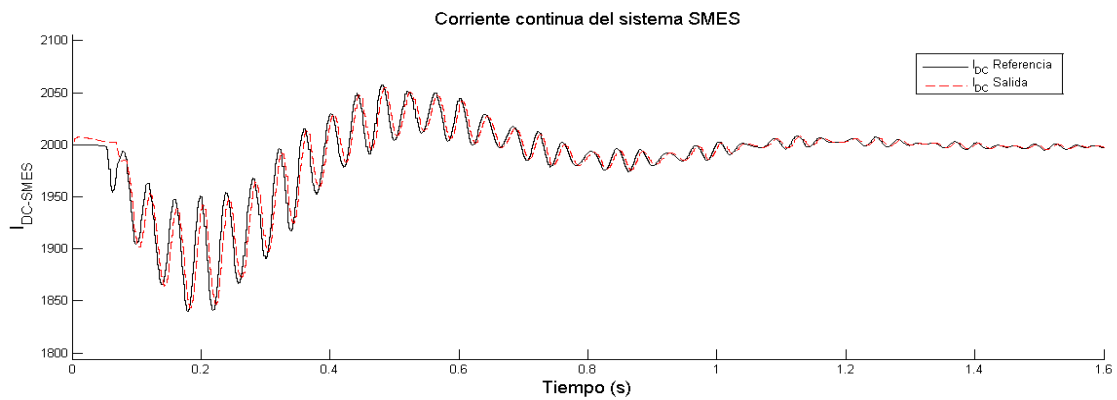


Figura 5.18: Referencia y salida del control de corriente en la bobina superconductora

5.3.3. Análisis Modal en el dominio de la Frecuencia.

El propósito de esta subsección es realizar un estudio de los modos torsionales del turbogenerador con y sin la unidad SMES, los cuales son analizados y obtenidos a partir de la FFT (Fast Fourier transform).

En la figura 5.19 muestra la FFT de la desviación de la velocidad del rotor para una falla trifásica en ausencia de la unidad SMES. Como se puede observar el modo torsional donde se concentra la mayor parte de la energía es el modo 1 a una frecuencia aproximadamente de 24.65 Hz. Este modo no amortiguado interactúa con la frecuencia eléctrica por debajo de la fundamental del sistema. Además de este modo 1, se presentan otros modos torsionales de baja frecuencia que interactúan con los modos eléctricos del sistema. Sin embargo, la magnitud de estos es muy inferior en comparación al modo 1 por lo que en la figura 5.19 no se pueden apreciar. A medida que el modo 1 reduce la magnitud el espectro de Fourier permite observar otros modos torsionales.

La FFT de la desviación de la velocidad del rotor con la unidad SMES se obtiene en la figura 5.20. En esta parte se presentan tres modos torsionales. El modo 0 o modo inercial que le corresponde la menor frecuencia natural, en este modo todas las masas oscilan al unísono, el cual resulta irrelevante cuando el interés se concentra en efectos torsionales producidos por los restantes modos naturales de oscilación. El modo 1, la magnitud decrece en función de tiempo significativamente en comparación al de la figura 5.19 debido al amortiguamiento activo creado a partir de la estrategia control de la unidad SMES. El modo 2 el cual tiene una frecuencia aproximadamente 32.39 Hz que también tiende a reducir su magnitud.

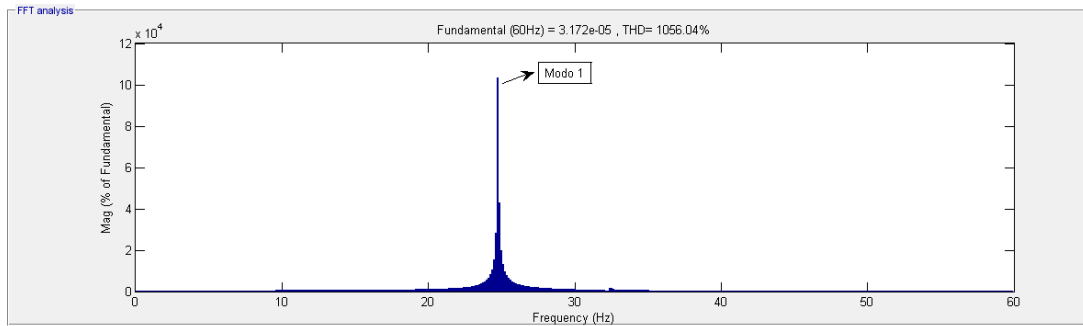


Figura 5.19: Modos oscilatorios de la desviación de velocidad del rotor a partir de la FFT sin SMES.

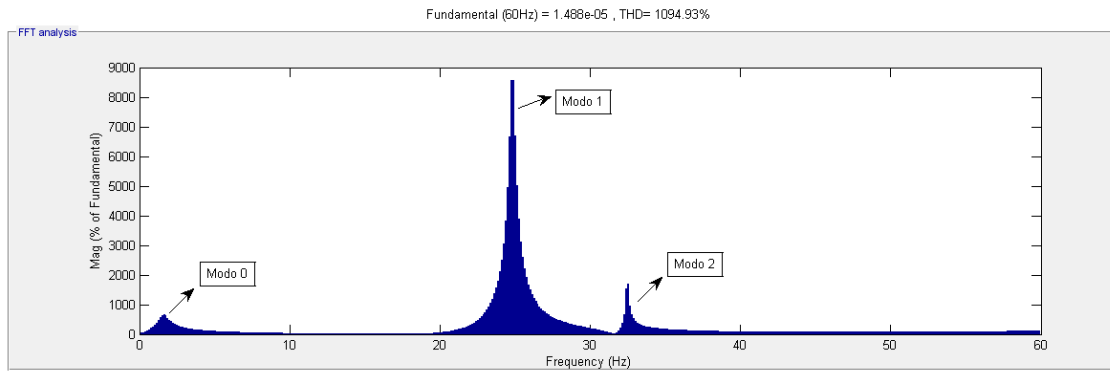


Figura 5.20: Modos oscilatorios de la desviación de velocidad del rotor a partir de la FFT con SMES.

De esta manera la unidad SMES amortigua las oscilaciones del fenómeno de Resonancia Subsíncrona. Este análisis modal comprueba los resultados obtenidos en el dominio del tiempo.

En la subsección 5.3.2 y 5.3.3 demuestra que la estrategia de control mitiga las oscilaciones electromecánicas producto del fenómeno de Resonancia Subsíncrona.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo presentó una nueva estrategia de control de sistema SMES integrados mediante PWM-CSC, con el fin de dar un amortiguamiento externo a las oscilaciones de baja frecuencia y evitar el fenómeno de Resonancia Subsíncrona en un sistema eléctrico de potencia.

La estrategia se basa en la carga y descarga de energía de la unidad SMES a través de un control de corriente. La salida de la potencia activa del convertidor fue modulada usando la señal de aceleración del generador. Se propuso un control basado en amortiguamiento activo y control primario de frecuencia.

Todas las simulaciones se llevaron a cabo para validar el desempeño del SMES basado en la estrategia de control propuesta. Esta estrategia demuestra que la tecnología SMES es una buena alternativa para mitigar el fenómeno oscilatorio causado por diferentes perturbaciones en el sistema de potencia.

Esta investigación sirve como base para futuros proyectos en esta dirección los cuales incluyen un esquema de control no-lineal la unidad SMES, consideración del retraso en las comunicaciones y optimización del diseño y dimensionamiento de la unidad.

6.1. Futuros Trabajos

El sistema de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) debe seguirse estudiando ya que éste tiene gran cantidad de aplicaciones en el sistema de potencia. Es un sistema que puede dar solución a diferentes problemas relacionados con las redes inteligentes como es el caso de las redes distribuidas, energías alternativas, micro-redes, entre otras.

En cuanto a la parte constructiva de la unidad SMES se debe seguir estudiando los diferentes elementos que la conforman, como es el caso de los materiales semiconductores, la superconductividad y en el desarrollo de diferentes bobinas, con el fin de poder reducir sus costos ya que por el momento es muy difícil poder acceder a este tipo de tecnología lo cual implica que los estudios realizados no se pueden llevar acabo en la práctica.

Otra parte fundamental es el estudio relacionado con el campo de la electrónica de potencia ya que como se demostró a lo largo del proyecto los convertidores de potencia son fundamentales en cuanto al control de las variables eléctricas de la bobina SMES y la integración al sistema de potencia. Existe un paradigma relativamente nuevo asociado al uso de convertidores multinivel modulares o MMC por sus siglas en inglés (*Modular Multilevel Converter*). El MMC puede ser potencialmente utilizado en el caso del sistema SMES por lo que se abre la posibilidad de desarrollar un nuevo control que permita mitigar el fenómeno de Resonancia Subsíncrona en base a la estrategia de control propuesta en este proyecto, debido a que recientemente se ha estudiado la posibilidad de usar el MMC como convertidor de corriente (PWM-CSC) mejorando las condiciones y estabilidad del sistema.

Como se demostró en el proyecto la estrategia de control propuesta fue capaz de mitigar el fenómeno de Resonancia Subsíncrona por lo tanto es posible que este control pueda estabilizar cualquier otro fenómeno dinámico. Además, se debe caracterizar el comportamiento del control utilizando optimización matemática con el fin de tener una mejor respuesta y un dimensionamiento de la unidad SMES como tener en cuenta el retraso en la comunicación.

Anexo A

Sistema de potencia simulado.

A.1. Segundo modelo de referencia IEEE para la simulación del fenómeno de resonancia Subsíncrona

La tabla A.1 muestra los parámetros de las líneas de transmisión y de las impedancias del sistema de potencia simulado(ver figura 5.12).

Parámetros de las impedancias de red por unidad ($S_{Base} = 100MV A - V_{Base} = 500kV$)		
Parámetro	Secuencia Positiva	Secuencia zero
R_T	0,0002	0,0002
X_T	0,0200	0,0200
R_1	0,0074	0,0220
X_{L1}	0,0800	0,2400
R_2	0,0067	0,0186
X_{L2}	0,0739	0,2100
R_{SYS}	0,0014	0,0014
X_{SYS}	0,0300	0,0300

Tabla A.1: Parámetros de la red.

En la tabla A.2 muestra los datos del generador sincrónico y en la figura A.1 se observa el modelo masa-resorte del eje de la máquina.

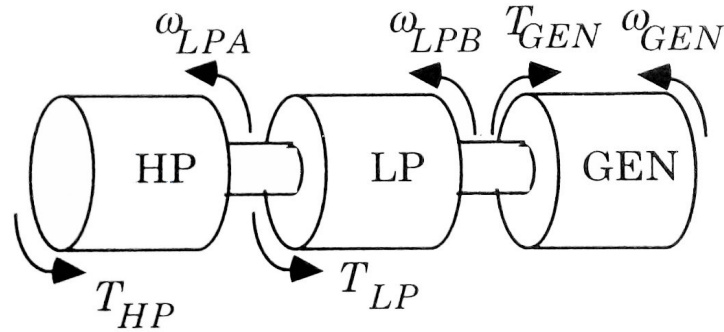


Figura A.1: Modelo del eje del generador.

Símbolo	Inductancias en Por Unidad.
R_s	0,0045
X_l	0,140
X_d	1,650
X'_d	0,250
X''_d	0,200
X_q	1,590
X'_q	0,460
X''_q	0,200
Símbolo	Constantes de Tiempo en Segundos
τ'_{do}	4,500
τ''_{do}	0,040
τ'_{qo}	0,550
τ''_{qo}	0,090
Parámetros Nominales	Potencia nominal del Generador
$S_{nom}[MVA]$	600
$V_{nom}[kV]$	22
$f_{nom}[Hz]$	60

Tabla A.2: Parámetros típicos de la maquina síncrona en el marco de referencia d-q.

Como se observa la maquina síncrona se modela con tres masas a lo largo del eje. En la tabla A.3 muestra los parámetros de masa-resorte los cuales se dan en unidades inglesas.

Masa	Inercia $lbm - ft^2$	Damping $lbf - ft - sec/rad$	Sección del Eje	Constantes del Resorte $lbf - ft/rad$
Gen	334,914	208,20	LP-Gen	$156,1 \times 10^6$
LP	370,483	230,40	HP-LP	$198,7 \times 10^6$
HP	109,922	68,38	—	—

Tabla A.3: Inercias del eje, Dampings y Constantes del Resorte para el segundo modelo referencia IEEE.

A.2. Parámetros nominales de la unidad SMES

En la tabla A.4 muestra los valores nominales del sistema SMES para el estudio y mitigación del fenómeno de resonancia Subsíncrona.

SMES	
$L[H]$	10
$V_{nom}[kV]$	115
$S_{base}[MVA]$	100

Tabla A.4: Parámetros de la unidad SMES.

A.3. Parámetros de la estrategia de control

En la tabla A.5 muestra los diferentes datos de la estrategia de control(ver capitulo 4) que se usaron para amortiguar la inestabilidad dinámica debido al fenómeno oscilatorio.

Estrategia de control	
Constante Proporcional del control PI (Kp)	188
Constante Integral del control PI (Ki)	3746
Resistencia trifasica Damping ($R[\Omega]$)	250
Coeficiente de amortiguamiento ($\zeta[pu]$)	80

Tabla A.5: Parámetros de la unidad SMES.

A.4. Sistema de potencia en simulink-Matlab

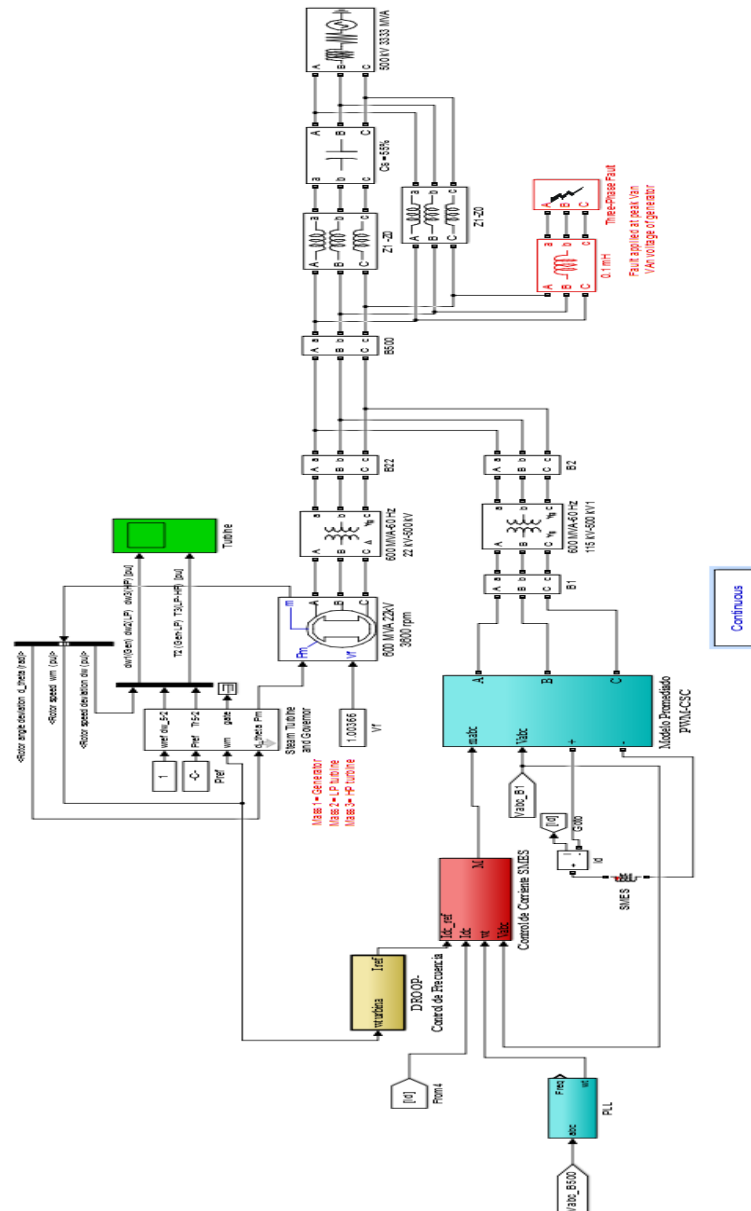


Figura A.2: Implementación completa en simulink-MATLAB del sistema en estudio incluyendo el sistema SMES, modelo promediado del PWM-CSC y la estrategia de control propuesta.

Bibliografía

- [1] K. Padiyar, *Power system dynamics*. BS publications, 2008.
- [2] I. S. R. W. Group *et al.*, “Proposed terms and definitions for subsynchronous oscillations,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, vol. 99, no. 2, pp. 506–511, 1980.
- [3] K. Clark, “Overview of subsynchronous resonance related phenomena,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D), 2012 IEEE PES*, May 2012, pp. 1–3.
- [4] M. H. Ali, B. Wu, R. Dougal *et al.*, “An overview of smes applications in power and energy systems,” *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.
- [5] R. FARMER, “Third supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems. discussion,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 6, no. 2, pp. 830–834, 1991.
- [6] L. Wang, “Damping of torsional oscillations using excitation control of synchronous generator: the ieee second benchmark model investigation,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 1, pp. 47–54, 1991.
- [7] L. Wang and Y.-Y. Hsu, “Damping of subsynchronous resonance using excitation controllers and static var compensations: A comparative study,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 1, pp. 6–13, 1988.
- [8] M. Iravani and R. Mathur, “Damping subsynchronous oscillations in power systems using a static phase-shifter,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 2, pp. 76–82, 1986.

- [9] A. Abu-Siada, "Damping of large turbo-generator subsynchronous resonance using superconducting magnetic energy storage unit," in *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian*. IEEE, 2010, pp. 1–4.
- [10] M. Farahani, "A new control strategy of smes for mitigating subsynchronous oscillations," *Physica C: Superconductivity*, vol. 483, pp. 34–39, 2012.
- [11] A. Soeprijanto and M. Abdillah, "Subsynchronous resonance damping using smes optimized by quantum behaved particle swarm optimization," in *Third International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*, 2011.
- [12] M. Rabbani, J. Devotta, and S. Elangovan, "Multi-mode wide range subsynchronous resonance stabilization using superconducting magnetic energy storage unit," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 45–53, 1999.
- [13] J. Devotta, M. Rabbani, and S. Elangovan, "Application of superconducting magnetic energy storage unit for damping of subsynchronous oscillations in power systems," *Energy conversion and management*, vol. 40, no. 1, pp. 23–37, 1999.
- [14] M. Anju and R. Rajasekaran, "Co-ordination of smes with statcom for mitigating ssr and damping power system oscillations in a series compensated wind power system," in *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2013 International Conference on*, Jan 2013, pp. 1–6.
- [15] R. D. Jaramillo Osorio, "Generación undimotriz: integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona," 2014.
- [16] I. E. C. (IEC), *Electrical Energy Storage Project Team*, 2011.
- [17] W. Buckles and W. V. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage," *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 20, no. 5, pp. 16–20, 2000.
- [18] A. G. Ruiz, *Sistemas de generacion de energia*. Universidad Tecnologica de Pereira, 2008.
- [19] W. V. Hassenzahl, "Will superconducting magnetic energy storage be used on electric utility systems?" *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 2, pp. 482–488, 1975.
- [20] H. Peterson, N. Mohan, and R. Boom, "Superconductive energy storage inductor-converter units for power systems," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 94, no. 4, pp. 1337–1348, 1975.

- [21] R. Kustom, J. Skiles, J. Wang, K. Klontz, T. Ise, K. Ko, and F. Vong, “Research on power conditioning systems for superconductive magnetic energy storage (smes),” *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 2, pp. 2320–2323, 1991.
- [22] R. Dávalos and J. Ramírez, “Características Funcionales del DSTAT-COM,” *CINVESTAV-IPN, Cigré-México Bienal*, pp. 1–6, 2001. [Online]. Available: <http://www.uncp.edu.pe/newfacultades/ingenieriasarqui/newelectrica/phocadownload/descargas/compstatcom.pdf>
- [23] M. P. Kazmierkowski and F. A. Silva, “Power Electronics Handbook, Third Edition (Rashid, M.H.; 2011) [Book News],” pp. 54–55, 2011.